

Oona Lehtonen

TEKOÄLYN HYÖDYNTÄMINEN TUOTANNONSUUNNITTELUSSA JA -OHJAUKSESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Hasse Nylund
Heinäkuu 2024

TIIVISTELMÄ

Oona Lehtonen: Tekoälyn hyödyntäminen tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaatinohjelma, konetekniikka
Kandidaatintyö
Heinäkuu 2024

Tässä kandidaatintyössä perehdytään tekoälyn soveltamiseen teollisuuden tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa. Tarkoituksena on tutkia, miten tekoälyteknologioilla voidaan tehostaa ja parantaa tuotantoprosessien suunnittelua ja hallintaa, tunnistaa prosessien virheitä ja edistää ennakoivaa huoltoa. Menetelminä käytetään kirjallisuuskatsausta ja tapaustutkimuksia eri teollisuudenaloilta.

Työssä käydään läpi tekoälyn ja koneoppimisen peruseräatteen sekä niiden sovellusmahdollisuuksia teollisuudessa. Erityisesti huomiota kiinnitetään siihen, miten tekoäly integroituu tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen prosesseihin, tarjoten keinoja prosessien automatisointiin ja tehostamiseen, tuotelaadun parantamiseen sekä tuotantokustannusten alentamiseen. Tämän lisäksi työssä käydään läpi tekoälyn kykyä käsitellä ja analysoida suuria datamääriä reaaliajassa, mikä mahdollistaa nopeammat ja tarkemmat päätöksentekoprosessit tuotannossa. Tekoälyn avulla voidaan esimerkiksi ennustaa tuotannon haasteita reaaliaikaisesti, mikä mahdollistaa nopeammat korjaavat toimet ja vähentää seisokkiaikoja.

Työn tulokset osoittavat, että tekoälyn käyttöönottolla on merkittävä rooli tuotantotehokkuuden lisäämisessä. Tekoälyn avulla voidaan yksinkertaistaa monimutkaisia tuotantoprosesseja ja lisätä niiden automaatiota, mikä johtaa kustannusten vähenemiseen ja tuotannon nopeutumiseen. Tekoäly voi myös parantaa tuotantoprosessien läpinäkyvyyttä ja ennustettavuutta. Erityisen lupaavana teknologiana on noussut esiin koneoppimiseen perustuvat ennustavat huoltomallit, jotka optimoivat laitteiston käyttöikä ja vähentävät yllättäviä huoltotarpeita. Tämä ei ainoastaan lisää tuotantokapasiteettia, vaan myös parantaa strategista suunnittelua ja resurssien hallintaa teollisuusyrityksissä. Näiden hyötyjen myötä yritykset voivat kehittää entistä kilpailukykyisempiä tuotteita ja prosesseja.

Työssä käydään läpi myös tekoälyn käyttöönottoon liittyviä haasteita, joita ovat esimerkiksi korkeat käyttöönotto- ja ylläpitokustannukset, tarve erikoisosaamiselle sekä datan turvallisuus. Vaikka tekoälyn käyttöönotto tuotannossa kohtaa haasteita, näiden esteiden ylittäminen edellyttää strategista lähestymistapaa. Investoimalla koulutukseen ja kehitykseen sekä yhteistyöhön teknologiatoimittajien kanssa yritykset voivat varmistaa tekoälyn tehokkaan ja turvallisen käytön.

Avainsanat: tekoäly, koneoppiminen, tuotannonsuunnittelu, tuotannonohjaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEKOÄLY JA KONEOPPIMINEN	2
2.1 Tekoäly.....	2
2.2 Koneoppiminen.....	3
2.3 Syväoppiminen	4
2.4 Älykäs päätöksenteko.....	4
2.5 Suuret kielimallit	5
3. TUOTANNONSUUNNITTELU JA –OHJAUS	6
3.1 Tuotannonsuunnittelu	6
3.2 Tuotannonohjaus.....	7
4. DATA TEOLLISUUS 4.0: SSA	8
4.1 Datan ominaisuudet.....	8
4.2 Datatyypit	8
4.3 Datan hallinta ja haasteet	9
5. TEKOÄLYN KÄYTTÖ TUOTANNONSUUNNITTELUSSA JA-OHJAUKSESSA	11
5.1 Teknologiat ja menetelmät.....	11
5.2 Käytännön esimerkit.....	12
5.2.1 Dynaaminen aikataulutus.....	12
5.2.2 Suorituskyvyn arviointi ja valvonta	12
5.2.3 Prosessien automaatio	13
5.3 Haasteet ja ratkaisut.....	13
5.4 Tulevaisuuden näkymät.....	14
6. POHDINTA	16
7. YHTEENVETO.....	18
LÄHTEET	19

1. JOHDANTO

Tekoälyn hyödyntäminen teollisuuden tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa on noussut merkittäväksi tutkimuskohteeksi viime vuosina. Tekoäly ja sen alakomponentit, kuten koneoppiminen ja syväoppiminen, tarjoavat uusia mahdollisuuksia tehostaa tuotantoprosesseja, parantaa päätöksenteon laatua ja lisätä joustavuutta muuttuvissa markkinatilanteissa (Jarrahi 2018).

Tämän työn tarkoituksena on tutkia, miten tekoälyteknologioita voidaan soveltaa teollisuuden tuotannonsuunnitteluun ja -ohjaukseen. Tutkimus pyrkii tarjoamaan kattavan analyysin tekoälyn mahdollisuuksista parantaa tuotantoprosessien tehokkuutta ja laatua. Erityisesti tarkastellaan, miten tekoäly voi auttaa ennakoimaan tuotannon haasteita, tunnistamaan prosessien virheitä ja optimoimaan resurssien käyttöä reaaliaikaisen datan avulla. Tekoälyn kyky analysoida suuria tietomääriä nopeasti ja tarkasti mahdollistaa entistä parempien päätöksentekoprosessien luomisen, mikä on ratkaisevan tärkeää modernissa teollisuudessa (Jarrahi 2018).

Lisäksi käsitellään tekoälyn mahdollisuuksia automaation lisäämisessä ja tuotantokustannusten vähentämisessä sekä tuotelaadun parantamisessa. Automaatio ei pelkästään tehosta tuotantoprosesseja, vaan se myös vähentää inhimillisten virheiden määrää ja mahdollistaa monimutkaisempien tuotantotehtävien suorittamisen tehokkaammin (Elbasheer et al. 2022). Tämä tutkimus tutkii, miten automaatio voidaan viedä seuraavalle tasolle tekoälyn avulla, mikä puolestaan voi johtaa merkittäviin kustannussäästöihin ja tuotantoprosessien parempaan hallintaan (Cañas et al. 2022).

Tutkimuksessa pyritään myös kartoittamaan tekoälyn käyttöönoton esteitä ja haasteita, kuten tarvittava erikoisosaaminen ja tietoturvakysymykset. Näiden haasteiden ymmärtäminen on välttämätöntä, jotta tekoälyn käyttöönotto teollisuuden tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa voidaan toteuttaa menestyksekkäästi.

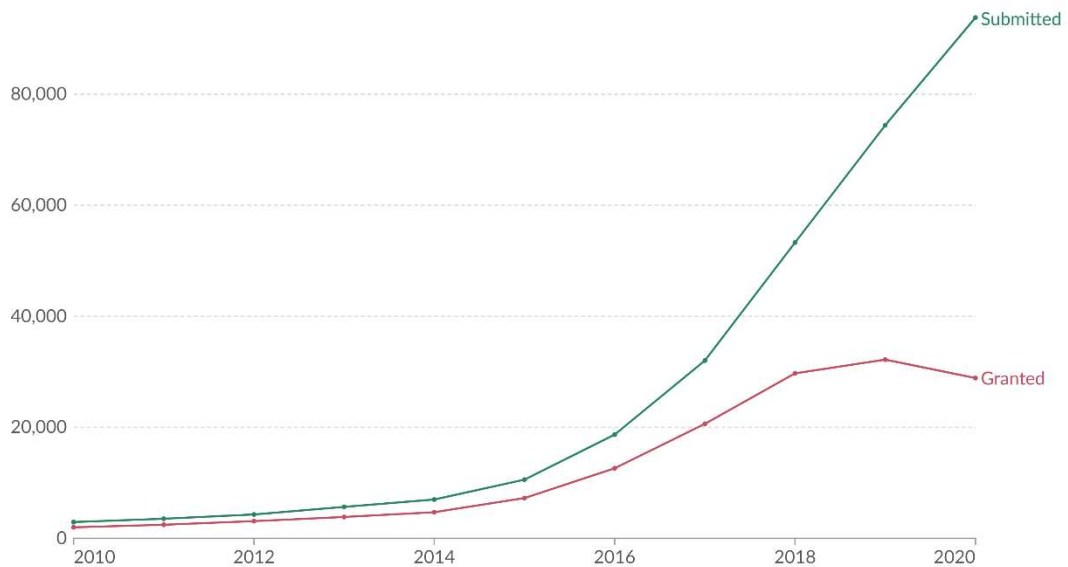
2. TEKOÄLY JA KONEOPPIMINEN

Tekoäly on yksi nopeimmin kasvavista tekniikan suuntauksista ja se voi muuttaa perusteellisesti tapaa, jolla yritykset suunnittelevat prosessejaan, tekevät päätöksiä ja ylläpitävät kilpailukykyään globaalissa taloudessa. Vuodesta 2000 vuoteen 2019 mennessä tekoälyyn liittyvien artikkeleiden määrä kasvoi 600 %. (Crew 2020) Tässä luvussa tarkastellaan, tekoälyn määritelmää ja osa-alueita, kuten koneoppiminen ja syväoppiminen. Kuvassa yksi näkyvät tekoälyyn liittyvät vuosittaiset patenttihakemukset. Kuvassa vihreällä näkyy hakemusten määrä ja punaisella hyväksytyjen hakemusten määrä. (Our World in Data n.d.)

Annual patent applications related to AI, by status, World

Our World
in Data

Patents related to artificial intelligence first submitted in the selected country's patent office. Subsequent granting of that patent could be by any country's patent office.



Data source: Center for Security and Emerging Technology (2023)

OurWorldInData.org/artificial-intelligence | CC BY

Note: According to calculations by CSET, the median time for a patent to be granted is 826 days from its initial filing date, while the average time is 860 days.

Kuva 1. Tekoälyyn liittyvät vuosittaiset patenttihakemukset

2.1 Tekoäly

Tekoälyä määrittelyminen on haasteellista, sillä se on hyvin laaja käsite, joka ulottuu monille tieteenaloille. Kukin ala pyrkii määrittelemään tekoälyn omasta näkökulmastaan, mikä johtaa lukuisiin erilaisiin määritelmiin. Tämän monimuotoisuuden takia tekoälylle löytyy erilaisia, vaihtelevan laajuisia määritelmiä. (Abbass 2021) Yksi yleisimmistä

määritelmistä kuvailee tekoälyä koneena, jonka ominaisuudet muistuttavat ihmisen älykkyyteen yhdistettyjä osa-alueita (Huang ja Rust 2018).

Tässä työssä käytetään määritelmää, jossa tekoäly nähdään teknologiana, joka simuloi ihmisen kognitiivisia toimintoja, kuten oppimista, havainnointia, ongelmanratkaisua ja päätöksentekoa (Collins et al. 2021). Tämä määritelmä keskittyy tekoälyn kykyyn suorittaa tehtäviä, jotka vaativat päätöksentekoprosesseja ja ihmismäistä älykkyyttä. Erityisesti teollisilla aloilla tekoälyä sovelletaan prosessien automatisointiin, tehokkuuden parantamiseen ja operatiiviseen päätöksentekoon, joissa määritelmän mukaiset kyvyt ovat keskeisessä roolissa. (Yu et al. 2024) Tämä määritelmä heijastaa myös tekoälyn yhä syvempää integroitumista teollisuuden prosesseihin, joka on keskeinen näkökohta tässä tutkielmassa. Tekoäly kuitenkin pohjautuu analytiikkaan ja dataan, joka muodostaa rajoitteita tekoälyn toimintaan. Tässä työssä pyritään myös käsittelemään näitä rajoituksia ja arvioimaan, miten ne vaikuttavat tekoälyn soveltamisen tehokkuuteen.

2.2 Koneoppiminen

Koneoppiminen on keskeinen osa tekoälyä ja datatiedettä. Se on tietojenkäsittelytieteen ja tilastotieteen risteämäkohta, jonka avulla voidaan mahdollistaa koneita, jotka parantavat toimintaansa olemassa olevan datan avulla. Koneoppimisen avulla voidaan parantaa ohjelmien toimintoja kuten puheen tunnistusta, konenäköä ja robottien kontrollointia. Usein koneoppiminen voi olla helpoin tapa kouluttaa systeemiä, verrattuna esimerkiksi siihen, että annetaan manuaalisesti tietokoneelle valmiita tulojen ja lähtöjen kombinaatioita.

Koneoppiminen on nopeasti kasvava tekninen ala, etenkin nykypäivänä, kun oppimisalgoritmit ja -teoriat kehittyvät vauhdilla. Lisäksi verkkodatan valtava määrä ja tarvittavan tekniikan hintojen aleneminen edistävät koneoppimisen mahdollisuuksia. Koneoppimista on käytössä kaikkialla tieteessä, teknologiassa ja kaupankäynnissä. Tämä johtaa siirtymistä enemmän todisteisiin perustuviin päätöksenteko tapoihin monilla aloilla kuten terveydenhuolto, teollisuus, koulutus, liike-elämä ja markkinointi. (Jordan ja Mitchell 2015)

Koneoppimisen muotoja on monia. Tärkeimmät kolme ovat kuitenkin seuraavassa taulukossa mainitut ohjattu ja ohjaamaton oppiminen sekä vahvistusoppiminen. (Usuga Cadavid et al. 2020)

Taulukko 1. *Koneoppimisen tärkeimmät metodit*

Oppimismuoto	Selitys
Ohjattu oppiminen	Arvioidaan funktiota $f(x) = y$ oppimalla tulojen x ja lähtöjen y väliset suhteet. (Usuga Cadavid et al. 2020)
Ohjaamaton oppiminen	Annetusta tietojoukosta pyritään löytämään malleja ja piilotettuja rakenteita. (Usuga Cadavid et al. 2020)
Vahvistusoppiminen	Tekoälyagentti valitsee toiminnon sen nykyisen tilan perusteella ja saa palautteen ja uuden tiedon ympäristöstään. (Yu et al. 2024)

2.3 Syväoppiminen

Syväoppiminen on erikoistunut koneoppimisen haara, joka jäljittelee ihmisaivojen toimintaa. Tässä tekniikassa käytetään laskentayksiköitä, jotka tunnetaan nimellä neuronit. Nämä neuronit on järjestetty kerrokselliseen rakenteeseen, jota kutsutaan piilokerroksiksi, muodostaen yhdessä neuroverkkoja. Nämä kerrokset ovat kykeneviä itsenäisesti oppimaan ja tunnistamaan datasta keskeisiä ominaisuuksia ilman ihmisen väliintuloa. Syväoppiminen optimoi näiden ominaisuuksien tunnistamisen itsenäisesti, oppien tunnistamaan kuvista esineitä, kasvoja tai muita merkittäviä elementtejä perustuen suureen määrään kerättyä ja kerrostettua tietoa. Tämä prosessi tapahtuu ilman ihmisen väliintuloa, mikä tekee syväoppimisesta voimakkaan työkalun monenlaisiin sovelluksiin, joissa koneiden tulee toimia itsenäisesti ja tehokkaasti. Tämä mahdollistaa syväoppimisjärjestelmien tehokkaan suoriutumisen monimutkaisista tehtävistä, kuten kuvien tunnistuksesta, puheen ymmärtämisestä ja tekstin käsittelystä. (Mueller et al. 2019)

2.4 Älykäs päätöksenteko

Älykäs päätöksenteko on tekoälyn osa-alue, joka keskittyy tekoälyn kykyyn tehdä itsenäisiä ja perusteltuja päätöksiä. Tämä prosessi yhdistää koneoppimisen ja syväoppimisen menetelmät tarjoten järjestelmille kyvyn analysoida dataa, oppia siitä ja mukautua uusiin tilanteisiin (Lehner et al. 2022, Collins et al. 2021).

Älykkään päätöksenteon keskeiset elementit ovat autonominen toiminta, adaptiivisuus ja kognitiiviset kyvyt. Autonominen toiminta tarkoittaa, että tekoälyjärjestelmät voivat toimia itsenäisesti ja tehdä päätöksiä ilman ihmisen välitöntä ohjausta. Tämä

mahdollistaa nopean reagoinnin muuttuviin olosuhteisiin ja vähentää inhimillisten virheiden riskiä (Lehner et al. 2022). Adaptiivisuus viittaa järjestelmien kykyyn oppia ja mukautua kokemustensa perusteella, mikä mahdollistaa jatkuvan parantamisen ja tehokkaamman toiminnan ajan myötä (Jarrahi 2018). Kognitiiviset kyvyt tarkoittavat tekoälyn kykyä suorittaa monimutkaisia tehtäviä, kuten ongelmanratkaisua ja päätöksentekoa, jotka vaativat tietojen yhdistämistä ja analysointia eri lähteistä (Collins et al. 2021).

Näiden elementtien avulla älykäs päätöksenteko parantaa organisaatioiden kykyä tehdä perusteltuja ja tehokkaita päätöksiä, mikä on erityisen tärkeää teollisuus 4.0 -ympäristössä, jossa datan määrä ja monimutkaisuus kasvavat jatkuvasti (Lehner et al. 2022, Jarrahi 2018).

2.5 Suuret kielimallit

Suurilla kielimalleilla (Large Language Models) tarkoitetaan edistyneitä tekoälyjärjestelmiä, jotka voivat käsitellä ja tuottaa inhimillistä kieltä suurten tietomäärien avulla. Näiden mallien ytimessä on kyky tunnistaa ja oppia kaavoja valtavista tekstimassoista, kuten lauseiden rakenteista ja sanojen merkitysyhteyksistä. Kun suurille kielimalleille syötetään luonnollisen kielen komentoja, ne pystyvät tulkitsemaan nämä ohjeet ja muuttamaan ne toiminnallisiksi tehtäviksi. Esimerkiksi ne voivat auttaa teollisuusrobottien työpolkujen suunnittelussa, päätöksenteossa ja tehtävien suorittamisessa, mikä parantaa teollisuusprosessien tehokkuutta ja joustavuutta (Fan et al. 2024).

3. TUOTANNONSUUNNITTELU JA –OHJAUS

Tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen tehtävänä on suunnitella jatkuva tuotantosuunnitelma useammalle suunnittelujaksolle. Tavoitteena on saada tietoon tarvittavat materiaalit ja resurssit sekä toteuttaa tuotanto-ohjelma väistämättömistä häiriöistä huolimatta. Näitä häiriöitä ovat esimerkiksi henkilöstöpula, konehäiriöt ja tarvikkeiden toimitushäiriöt. Keskeisiä tehtäviä tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa on tuotanto-ohjelman suunnittelu, materiaaliressurssien suunnittelu sekä ulkoisen ja oman tuotannon suunnittelu ja hallinta. Tuotanto-ohjelman suunnittelussa määritellään mitä missä määrissä tuotteita valmistetaan seuraavina suunniteltuina ajanjaksoina. Tarvittavat materiaalit ja muut resurssit johdetaan tuotanto-ohjelmasta. Tätä varten määritetään tuotteen ja komponenttien materiaali vaatimukset, aikataulutetaan tuotantotilaukset ja määritetään kuormitukset tuotannon kapasiteettiryhmille. Tuotannonsuunnitteluun ja -ohjaukseen kuuluu myös tilattavien komponenttien ja osien tilauserien määrittäminen, tarjousten saaminen ja toimittajien valinta. (Lödding ja Rossi 2013)

3.1 Tuotannonsuunnittelu

Tuotannonsuunnittelu on prosessi, jossa tehdään tuotantosuunnitelma olemassa olevien rajoitteiden pohjalta. Se on tuotesuunnittelun ja tuotannon välinen yhtymäkohta ja on tärkeä tekijä kustannusten vähentämisessä ja markkinoille tulon nopeuttamisessa (Kapulin ja Russkikh 2020). Tavoitteena tällä on vastata kuluttajakysyntään alhaisimmilla mahdollisilla kustannuksilla (Wen et al. 2017). Tuotannonsuunnittelu voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, joita ovat strateginen suunnittelu, taktinen suunnittelu ja toiminnan aikataulutus (Hung et al. 2013).

Useimmissa tuotantoympäristöissä on useanlaisia epävarmuuksia. Esimerkiksi suunniteltujen tuotantomäärien mennessä tuotantoon, saattaa tulokset olla vaihtelevia. Nämä epävarmuustekijät vaikuttavat ja vaikeuttavat tuotannon suunnittelua ja ohjausta. (Kazemi Zanjani et al. 2011) Tuotannonsuunnittelua varten onkin kehitetty useita järjestelmiä ja malleja, kuten MRP eli *Material Requirements Planning* ja ERP eli *Enterprise Resource Planning*. Näillä pyritään helpottamaan suunnittelussa tehtäviä päätöksiä. (Pochet ja Wolsey 2006) Tuotannonsuunnittelussa voidaan käyttää apuna myös tehdassimulointia, esimerkiksi suunniteltaessa tuotantolinjoja.

3.2 Tuotannonohjaus

Tuotannonohjaus on tärkeä osa yrityksen toimintaa. Ilman hyvää valmistuksen valvontaa, voidaan menettää mahdollisuuksia hyödyntää muuten hyviä olosuhteita, ja hyvällä tuotannonohjauksella voidaan myös kompensoida tuotannosuunnittelussa tehtyjä virheitä. Tuotannonohjauksesta onkin tulossa aina vain tärkeämpää. Vaihtoehtojen määrän ja epävarmojen markkinoinnin takia kysyntää on vaikea ennustaa luotettavasti. Näin ollen on jatkuvasti vaikeampaa luoda luotettavia tuotanto-ohjelmia. Valmistusohjauksen onkin pystyttävä reagoimaan nopeasti tuotantosuunnitelmien muutoksiin. Tämän lisäksi tuotannonohjaukseen liittyvien toimintojen määrä kasvaa koko ajan. Aiemmin tuotannonohjaukseen on sisältynyt vain työpisteiden toimintojen jaksottamisen, mutta nykyään myös tilausten luovuttaminen tuotantoon ja kapasiteetin säätely kuuluvat tuotannonohjauksen piiriin. Varasto-ohjautuvassa tuotannossa tuotannonohjaus ottaa myös vastuuta tuotannon suunnittelusta luomalla tilauksia. (Lödding ja Rossi 2013)

4. DATA TEOLLISUUS 4.0: SSA

Datan rooli teollisuus 4.0:ssa on keskeinen, sillä se mahdollistaa älykkäiden järjestelmien tehokkaamman hyödyntämisen automatisoimalla rutiinotoimintoja ja tehostamalla päätöksentekoprosesseja. Kyberfyysiset järjestelmät, jotka integroivat fyysiset laitteet ja digitaalisen ohjauksen, tukevat näitä toimintoja tarjoamalla alustan automaattiselle konfiguroinnille ja dynaamiselle säätämiselle, jotka sopeutuvat nopeasti muuttuviin tuotantovaatimuksiin. Datan rooli on siis olennainen teollisuuden prosessien, jatkuvassa innovoinnissa ja tehokkuuden parantamisessa. (Duan ja Da Xu 2021)

4.1 Datan ominaisuudet

Teollisuus 4.0 on lisännyt tuotannosta saatavan datan määrää huomattavasti, mikä on johtanut termiin 'massadata'. Tuotannon yhteydessä massadata viittaa valtavaan määrään eri lähteistä peräisin olevaa tietoa, joka kattaa tuotteen koko elinkaaren. Massadatan ominaispiirteet voidaan tiivistää viiteen V-kirjaimeen: volume eli suuri määrä, variety eli monimuotoisuus, joka kattaa datan muodot ja lähteet, velocity eli nopeus, jolla dataa luodaan ja päivitetään, veracity eli datan epätäydellinen luotettavuus, sekä value eli datan sisältämä potentiaalinen arvo. (Tao et al. 2018)

4.2 Datatyypit

Älykäs valmistus teollisuus 4.0-ympäristössä hyödyntää monipuolisesti erilaisia datatyyppejä, joiden tehokas käyttö on keskeinen osa nykyaikaisen teollisuuden toimintaa. Data, joka voi olla sekä rakenteellista että rakenteetonta, kerätään eri lähteistä ja se kattaa laajan kirjon tietoja tuotantoprosessien, laitteiden kunnon, käyttäjäinteraktioiden sekä tuotteiden suorituskyvyn ymmärtämiseksi ja optimoimiseksi. Data voidaan jakaa datalähteiden mukaan viiteen eri kategoriaan. Nämä kategoriat ovat hallintatiedot, laitteiden data, käyttäjien data, tuotteiden data ja julkinen data. Eri datatyypit, tarjoavat yksityiskohtaisia näkemyksiä ja tukevat päätöksentekoa kaikilla teollisuuden sektoreilla. (Tao et al. 2018)

Tuotannonhallintaa koskeva data saadaan eri tuotantojärjestelmistä, kuten ERP (Enterprise Resource Planning) ja MES (Manufacturing Execution System), sekä muista järjestelmistä kuten CRM (Customer Relationship Management), SCM (Supply Chain

Management) ja PDM (Product Data Management). Tämä data kattaa tuotesuunnittelun, materiaalinhallinnan, tuotannosuunnittelun, ylläpidon, varastohallinnan, myynnin, markkinoinnin, jakelun, asiakaspalvelun ja taloushallinnon (Tao et al. 2018).

Laitteiden data saadaan tuotannon laitteistosta ja antureista, jotka mittaavat koneiden ja työntekijöiden toimintaa. Tämä data liittyy laitteiden suorituskykyyn, käyttöolosuhteisiin ja huoltohistoriaan. Reaaliaikainen seuranta parantaa laitteiden tehokkuutta ja ennakoivaa ylläpitoa, mikä vähentää seisokkeja ja parantaa tuotantolinjan sujuvuutta (Tao et al. 2018).

Käyttäjädatta, kerätty esimerkiksi verkkokaupoista ja sosiaalisen median alustoilta, sisältää tietoja käyttäjädemografiasta ja käyttäytymisestä. Tämä data auttaa yrityksiä räätälöimään tuotteita ja parantamaan niiden laatua tarjoamalla varhaisia varoituksia laatuongelmista (Raj et al. 2020).

Tuotetdata kattaa tiedot tuotteiden käytöstä ja suorituskyvystä, mukaan lukien viat ja korjaukset. Tämä data mahdollistaa ennakoivan huollon ja vikojen ennustamisen, mikä parantaa asiakastytyvyyttä ja tuotteiden käyttöikä. Tuotetdan analysointi edistää jatkuvaa tuotekehitystä perustuen käyttäjäkokemukseen (Tao et al. 2018).

Julkinen data sisältää tietoja immateriaalioikeuksista, tieteellisestä kehityksestä, ympäristönsuojelusta ja standardeista. Tämä tieto auttaa valmistajia varmistamaan säädösten noudattamisen ja sopeutumaan tuleviin muutoksiin, edistäen kestävä tuotantoa (Tao et al. 2018).

Keinotekoinen data tuotetaan tietokonesimulaatioiden avulla ja on keskeinen koneoppimisen sovelluksissa tuotannon suunnittelussa ja ohjauksessa. Tämä data mahdollistaa erilaisten skenaarioiden testaamisen ilman riskejä, parantaen päätöksentekoa ja tuotantolinjojen optimointia. Keinotekoinen data tarjoaa myös oivalluksia tuotteiden suorituskyvystä ja parannuksista, ollen korvaamaton resurssi teollisessa innovaatiossa (Usuga Cadavid et al. 2020).

4.3 Datan hallinta ja haasteet

Datan hallintaan ja käyttöön teollisuus 4.0-ympäristössä liittyy useita keskeisiä haasteita, jotka on otettava huomioon. Suuren datamäärän käsittely ja reaaliaikainen analysointi altistavat järjestelmät kyberuhille, joten tietoturvamekanismien, kuten salaustekniikoiden ja kyberriskien hallintatekniikoiden, käyttö on välttämätöntä kriittisten teollisten

järjestelmien suojaamiseksi. Lisäksi huonolaatuinen data voi johtaa virheellisiin analyysituloksiin ja heikentää päätöksenteon laatua, joten organisaatioiden on varmistettava, että kerätty data on tarkkaa, luotettavaa ja ajantasaista, mikä edellyttää jatkuvaa laadunvalvontaa ja tehokkaita datan puhdistusprosesseja. Järjestelmien integrointi tuotantoverkoston läpi parantaa tiedonkulkua ja yhteistyötä, mutta tuo myös haasteita datan harmonisoinnissa ja yhteensopivuudessa eri järjestelmien välillä. On tärkeää varmistaa, että kaikki järjestelmät toimivat saumattomasti yhdessä ja tukevat kokonaisvaltaista ja reaaliaikaista päätöksentekoa. Näiden haasteiden ratkaiseminen on välttämätöntä, jotta datan hallinta teollisuus 4.0 -ympäristössä olisi tehokasta ja turvallista. (Bousdekis et al. 2021)

5. TEKOÄLYN TUOTANNONSUUNNITTELUSSA JA-OHJAUKSESSA

KÄYTTÖ

Tekoälyn käyttö tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa on noussut keskeiseksi tekijäksi teollisuus 4.0-ympäristössä. Tekoäly mahdollistaa tuotantoprosessien optimoinnin, resurssien tehokkaamman käytön ja reaaliaikaisen päätöksenteon, mikä parantaa tuotannon joustavuutta ja tehokkuutta. Erityisesti älykkäät tuotantojärjestelmät ja ennakoivat analytiikat voivat auttaa yrityksiä vastaamaan nopeisiin markkinamuutoksiin ja asiakaskysynnän vaihteluihin, mikä on kriittistä globaalissa kilpailuympäristössä. (Gabsi 2024)

5.1 Teknologiat ja menetelmät

Tekoälyä hyödynnetään monin tavoin tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa. Elbasheer et al. (2022) korostavat tekoälypohjaisten järjestelmien kykyä parantaa tuotannon suunnittelua ja ohjausta. Näissä järjestelmissä käytetään koneoppimismalleja ja algoritmeja, jotka analysoivat suuria määriä dataa ja oppivat niistä, mikä mahdollistaa ennakoivien analyysien tuottamisen. Tämä puolestaan auttaa ennustamaan kysynnän vaihteluita, optimoimaan tuotantoaikatauluja ja vähentämään seisokkeja. Lisäksi syväoppimisen avulla voidaan tunnistaa monimutkaisia kuvioita tuotantodatasarjoista, mikä parantaa laadunvalvontaa ja vikojen ennakoimista (Elbasheer et al. 2022).

Cañas et al. (2022) mukaan teollisuus 4.0-teknologioiden, kuten IoT, big data -analytiikan ja koneoppimisen, integrointi on ratkaisevan tärkeää tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen edistämiseksi. Nämä teknologiat helpottavat reaaliaikaista datanhallintaa, dynaamista suunnittelua ja autonomista ohjausta, mikä parantaa tuotantojärjestelmien reagoivuutta ja tehokkuutta. Näiden teknologioiden käyttöönotto tuo kuitenkin merkittäviä haasteita, erityisesti pk-yrityksille, johtuen korkeista kustannuksista ja monimutkaisuudesta (Cañas et al. 2022).

Jatkuva oppiminen on olennainen osa älykästä tuotannonsuunnittelua ja -ohjausta, mahdollistaen jatkuvan parantamisen. Rahmani et al. (2022) korostavat asiantuntijatiedon keräämisen ja mallintamisen tärkeyttä koneoppimisalgoritmien avulla, mikä mahdollistaa ajan myötä tietoisemman ja tarkemman päätöksenteon. Tämä lähestymistapa ei ainoastaan paranna operatiivista tehokkuutta, vaan myös edistää jatkuvan parantamisen kulttuuria organisaatiossa (Rahmani et al. 2022).

Elbasheer et al. (2022) tunnistavat tekoälyn ja koneoppimisen keskeisiä sovelluksia tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa, kuten dynaaminen aikataulutusta, suorituskyvyn arviointi ja prosessien automaatio. Nämä teknologiat mahdollistavat reaaliaikaisen datanhallinnan ja autonomisen päätöksenteon, mikä on ratkaisevaa modernin tuotantoympäristön monimutkaisuusien hallinnassa (Elbasheer et al. 2022).

Chang, J. et al. (2022) korostavat vahvistusoppimisen käyttöä dynaamisessa aikataulutuksessa, osoittaen kuinka nämä algoritmit voivat mukautua reaaliaikaisiin muutoksiin ja optimoida tuotantoaikatauluja tehokkaasti. Tämä lähestymistapa vähentää merkittävästi seisokkiaikoja ja parantaa resurssien allokointia (Chang, J. et al. 2022).

5.2 Käytännön esimerkit

Tekoälyn soveltaminen tuotannonsuunnittelussa ja -ohjauksessa kattaa useita keskeisiä osa-alueita, kuten dynaamisen aikataulutuksen, suorituskyvyn arvioinnin ja valvonnan sekä prosessien automaation.

5.2.1 Dynaaminen aikataulutusta

Dynaaminen aikataulutusta mahdollistaa tuotantoaikataulujen joustavan mukauttamisen, mikä parantaa reagoitakykyä odottamattomiin tapahtumiin tuotannossa. Esimerkiksi tekoäly voi analysoida reaaliaikaista tuotantodataa ja ehdottaa muutoksia aikatauluihin, jotta resurssien käyttö optimoidaan ja tuotannon pullonkaulat minimoidaan. Tekoälypohjainen aikataulutustajärjestelmä voi hyödyntää vahvistusoppimista, jossa agentti oppii parhaan toimintatavan kokeilemalla ja saamalla palkkiosignaaleja. Vahvistusoppimisen avulla järjestelmä voi käsitellä dynaamisia ja monimutkaisia tuotanto-olosuhteita paremmin kuin perinteiset menetelmät. Esimerkiksi yhdessä tutkimuksessa tekoälypohjainen aikataulutustajärjestelmä onnistui vähentämään tuotantoseisokkeja 15 % ja parantamaan resurssien käyttöastetta merkittävästi (Esteso et al. 2023). Tämä osoittaa vahvistusoppimisen potentiaalin parantaa tuotannon tehokkuutta ja joustavuutta, erityisesti kun otetaan huomioon tuotannon epävarmuudet ja ei-lineaariset ominaisuudet.

5.2.2 Suorituskyvyn arviointi ja valvonta

Suorituskyvyn arviointi ja valvonta antavat mahdollisuuden tunnistaa tuotantoprosessien heikot kohdat ja tehdä informoituja päätöksiä prosessien parantamiseksi. Tekoäly voi auttaa tunnistamaan poikkeamia tuotantoprosesseissa ja ennakoimaan mahdollisia laatuongelmia. Esimerkiksi tekoälypohjaiset valvontajärjestelmät ovat parantaneet

tuotantolinjojen tehokkuutta ja laatua vähentämällä virheiden määrää ja parantamalla tuotteiden laatua (Oluysisola et al. 2022).

5.2.3 Prosessien automaatio

Prosessien automaatio mahdollistaa tuotantostrategioiden automatisoinnin ja prosessien hallinnan, mikä lisää tuotannon joustavuutta ja tehokkuutta. Tekoäly voi esimerkiksi ohjata tuotantokoneita itsenäisesti ja säätää niiden toimintaa reaaliaikaisesti perustuen kerättyyn dataan ja analytiikkaan. Tämä on vähentänyt manuaalisen työn tarvetta ja parantanut tuotannon tehokkuutta useissa tapauksissa. (Cañas et al. 2022)

Automaatio mahdollistaa myös nopean reagoinnin tuotantoprosessien muutoksiin ja häiriöihin. Tekoälypohjaiset järjestelmät voivat tunnistaa poikkeamat ja optimoida tuotannon parametrit välittömästi, mikä minimoi seisokkien ja virheiden aiheuttamat häiriöt. Tämä parantaa tuotantoprosessien jatkuvuutta ja luotettavuutta. (Cañas et al. 2022)

Tekoäly analysoi suuria tietomääriä reaaliaikaisesti, mikä mahdollistaa tarkemman ja nopeamman päätöksenteon. Koneoppimisalgoritmit tunnistavat monimutkaisia kuvioita ja trendejä, joita perinteiset menetelmät eivät havaitse, mikä optimoi prosessit ja tehostaa resurssien käyttöä. (Cañas et al. 2022)

Ennakoiva huolto, jossa koneiden kuntoa seurataan jatkuvasti sensorien avulla, mahdollistuu tekoälyn avulla. Kerättyä dataa analysoimalla tekoäly ennakoii mahdolliset viat ennen niiden ilmenemistä, mikä vähentää odottamattomista rikkoutumisista aiheutuvia kustannuksia ja seisokkeja. (Cañas et al. 2022)

Cañas et al. (2022) huomauttavat, että tekoälyn ja automaation yhdistäminen voi johtaa merkittäviin kustannussäästöihin. Työvoimakustannukset pienenevät, kun manuaaliset, toistuvat tehtävät automatisoidaan, ja tuotannon virheiden määrä vähenee, mikä vähentää hukkaa ja parantaa tuotantolinjan laatua. Nämä tekijät parantavat yrityksen kilpailukykyä ja mahdollistavat nopeamman sopeutumisen markkinoiden muutoksiin.

5.3 Haasteet ja ratkaisut

Tekoälyn käyttöön liittyy myös haasteita, kuten tietoturva, järjestelmien integrointi ja tekoälymallien läpinäkyvyys. Tekoälypohjaisten järjestelmien käyttöönotto vaatii vahvaa tietoturvaa, koska ne käsittelevät suuria määriä sensitiivistä dataa. Tietoturvaratkaisuihin kuuluu datan salaaminen, pääsynhallinta ja jatkuva valvonta kyberuhkien varalta. Lisäksi järjestelmien integrointi olemassa oleviin tuotantoprosesseihin voi olla monimutkaista ja vaatia erityistä asiantuntemusta. Integraation onnistuminen edellyttää standardien ja

yhteisten rajapintojen käyttöä, jotka varmistavat eri järjestelmien yhteensopivuuden. Tekoälymallien läpinäkyvyys on toinen merkittävä haaste, sillä päätöksenteon perustana olevien mallien tulee olla ymmärrettäviä ja perusteltavissa. Tämä voidaan saavuttaa käyttämällä selitettäviä tekoälymalleja, jotka tarjoavat selityksiä tekoälyjärjestelmien tekemiin päätöksiin (Rahmani et al. 2022).

5.4 Tulevaisuuden näkymät

Tulevaisuuden näkymät tekoälyn käytössä tuotannosuunnittelussa ja -ohjauksessa ovat lupaavat. del Real Torres, A. et al. (2022) ehdottavat, että tulevaisuuden tutkimuksessa tulisi keskittyä kehittyneiden koneoppimistekniikoiden, kuten syväoppimisen ja vahvistusoppimisen, integrointiin. Näillä edistysaskeleilla on potentiaalia mullistaa tuotannosuunnittelu ja -ohjaus mahdollistamalla tarkemmat ja mukautuvammat suunnitteluprosessit (del Real Torres, A. et al. 2022).

Cañas et al. (2022) tukevat tätä näkökulmaa ja korostavat, että syväoppimisen ja vahvistusoppimisen yhdistäminen nykyisiin tuotannonohjauksjärjestelmiin voi merkittävästi parantaa järjestelmien suorituskykyä ja joustavuutta. Tekoälyn kyky käsitellä suuria määriä dataa ja oppia siitä reaaliajassa mahdollistaa nopeammat ja tarkemmat päätökset tuotantoprosessien optimoinnissa.

Tekoälyn kehityksen myötä on odotettavissa, että automaatio tulee entistä älykkäämmäksi ja sopeutuvammaksi. Tämä mahdollistaa tuotantolaitosten reagoimisen markkinoiden muutoksiin ja asiakaskysynnän vaihteluihin entistä nopeammin ja tehokkaammin. Tulevaisuudessa tekoälyn rooli tuotannosuunnittelussa ja -ohjauksessa tulee olemaan yhä keskeisempi, ja sen sovellukset tulevat laajenemaan kattamaan entistä monimutkaisempia ja kriittisempiä osia tuotantoketjuista (Cañas et al. 2022).

Lisäksi tekoälyn kehitys mahdollistaa paremman integraation muiden teknologioiden, kuten esineiden internetin (IoT) ja kyberfyysisten järjestelmien (CPS), kanssa. Tämä integrointi voi johtaa entistä älykkäämpiin ja autonomisempiin tuotantoympäristöihin, joissa järjestelmät voivat itse diagnosoida ja korjata virheitä, optimoida toimintojaan ja jopa ennakoida tulevia tarpeita ja haasteita (Cañas et al. 2022).

Suuret kielimallit, kuten GPT-4, mullistavat merkittävästi teollisuuden tuotannosuunnittelua ja -ohjausta. Ne parantavat ihmisen ja robotin välistä vuorovaikutusta tulkitsemalla luonnollisen kielen komentoja, mikä vähentää erikoisohjelmointiosaamisen tarvetta ja helpottaa robottien integrointia. Suuret kielimallit voivat itsenäisesti suunnitella työkalupolkuja, tehdä päätöksiä ja suorittaa monimutkaisia

tehtäviä tarkasti, mikä lisää tuotannon joustavuutta ja tehokkuutta. Ne parantavat päätöksentekoa ja ongelmanratkaisua analysoimalla dataa useista lähteistä, mahdollistavat prosessien jatkuvan parantamisen ja optimoinnin sekä osoittavat hyviä tuloksia tehtävien suunnittelussa ja toteutuksessa. (Fan et al. 2024)

Suurten kielimallien tulevaisuus teollisuudessa on lupaava, ja innovaatioita, kuten visuaalista semanttista ohjausta ja reaaliaikaisia palautesilmukoita, tutkitaan tehostamaan niiden sovellettavuutta ja suorituskykyä. Näiden edistysaskeleiden odotetaan johtavan seuraavaan automaation ja älykkään valmistuksen aaltoon, tehden suurista kielimalleista keskeisiä työkaluja teollisuus 4.0-maisemassa. (Fan et al. 2024)

Kaiken kaikkiaan tulevaisuuden tutkimuksen tulisi keskittyä edistyneiden koneoppimistekniikoiden käytännön sovelluksiin ja niiden vaikutuksiin tuotannon tehokkuuteen, joustavuuteen ja kestävyYTEEN. Tämä edellyttää sekä teknologista innovointia että tiivistä yhteistyötä teollisuuden ja akateemisen maailman välillä, jotta voidaan kehittää ja ottaa käyttöön uusia ratkaisuja, jotka vastaavat modernin teollisuuden tarpeisiin ja haasteisiin (Cañas et al. 2022).

6. POHDINTA

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin tekoälyteknologioiden soveltamista teollisuuden tuotannosuunnitteluun ja -ohjaukseen, erityisesti kehittyneiden koneoppimistekniikoiden, kuten syväoppimisen ja vahvistusoppimisen, näkökulmasta. Tutkimus osoitti, että tekoälyllä on merkittävä potentiaali parantaa tuotantoprosessien tehokkuutta, joustavuutta ja tarkkuutta. Erityisesti reaaliaikainen data-analyysi ja ennakoiva huolto voivat vähentää seisokkeja ja virheitä, mikä parantaa tuotannon jatkuvuutta ja luotettavuutta.

Keskeinen löydös oli tekoälyn kyky analysoida suuria tietomääriä nopeasti ja tarkasti, mikä mahdollistaa entistä parempien päätöksentekoprosessien luomisen. Tämä on erityisen tärkeää nykyaikaisessa teollisuudessa, jossa nopea reagointi ja tarkkuus ovat avainasemassa. Tekoälyn avulla tuotantokoneet voivat toimia itsenäisesti ja säätää toimintaansa reaaliaikaisen datan perusteella, mikä vähentää inhimillisten virheiden määrää ja mahdollistaa monimutkaisempien tehtävien suorittamisen tehokkaammin.

Tutkimuksessa nousi esiin myös haasteita, kuten tekoälyn käyttöönoton vaativat alkuinvestoinnit, erikoisosaamisen tarve ja tietoturvakysymykset. Nämä haasteet voivat hidastaa tekoälyn laajamittaista käyttöönottoa, mutta ne eivät ole ylitsepääsemättömiä. Tulevaisuuden tutkimuksessa tulisi keskittyä näiden haasteiden ratkaisemiseen sekä kehittämään käyttäjäystävällisempiä ja integroitavampia järjestelmiä.

Cañas et al. (2022) korostavat tulevaisuuden tutkimuksen tarvetta keskittyä kehittyneiden koneoppimistekniikoiden, kuten syväoppimisen ja vahvistusoppimisen, integrointiin tuotannosuunnittelussa ja -ohjauksessa. Näillä teknologioilla on potentiaalia mullistaa alaa mahdollistamalla tarkemmat ja mukautuvammat suunnitteluprosessit. Tekoälyn ja automaation yhdistäminen voi johtaa merkittäviin kustannussäästöihin ja parantaa tuotantolinjojen laatua.

On odotettavissa, että automaatio tulee entistä älykkäämmäksi ja sopeutuvammaksi, mikä mahdollistaa tuotantolaitosten reagoimisen markkinoiden muutoksiin ja asiakaskysynnän vaihteluihin entistä nopeammin ja tehokkaammin. Tekoälyn rooli tuotannosuunnittelussa ja -ohjauksessa tulee olemaan yhä keskeisempi, ja sen sovellukset laajenevat kattamaan entistä monimutkaisempia ja kriittisempiä osia tuotantoketjuista.

Tutkimuksen rajoituksia ovat tekoälyteknologioiden käyttöönottoon liittyvä laajan datan kerääminen ja käsittely, mikä voi olla haastavaa tietyissä teollisuudenaloissa. Lisäksi

tekoälyn eettiset kysymykset ja niiden vaikutukset työvoimaan ovat tekijöitä, joita on tarkasteltava huolellisesti.

Tulevaisuuden tutkimuksen tulisi keskittyä edistyneiden koneoppimistekniikoiden käytännön sovelluksiin ja niiden vaikutuksiin tuotannon tehokkuuteen, joustavuuteen ja kestävyteen. Tämä edellyttää teknologista innovointia ja tiivistä yhteistyötä teollisuuden ja akateemisen maailman välillä, jotta voidaan kehittää ja ottaa käyttöön uusia ratkaisuja, jotka vastaavat modernin teollisuuden tarpeisiin ja haasteisiin (Cañas et al. 2022).

Tutkimuksen tulokset korostavat tekoälyn suurta potentiaalia teollisuuden tuotannosuunnittelussa ja -ohjauksessa. Tekoälyn avulla yritykset voivat parantaa tuotantoprosessejaan, vähentää kustannuksia ja lisätä kilpailukykyään. Jatkuva tutkimus ja kehitys tällä alalla ovat välttämättömiä, jotta voidaan hyödyntää tekoälyn tarjoamat mahdollisuudet täysimääräisesti.

7. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin tekoälyteknologioiden soveltamista teollisuuden tuotannosuunnitteluun ja -ohjaukseen. Erityisesti keskityttiin kehittyneiden koneoppimistekniikoiden, kuten syväoppimisen ja vahvistusoppimisen, hyödyntämiseen. Tutkimus osoitti, että tekoälyllä on merkittävä potentiaali parantaa tuotantoprosessien tehokkuutta, joustavuutta ja tarkkuutta. Reaaliaikainen data-analyysi ja ennakoiva huolto voivat vähentää seisokkeja ja virheitä, mikä parantaa tuotannon jatkuvuutta ja luotettavuutta. Tekoälyn avulla voidaan myös optimoida resurssien käyttöä ja parantaa päätöksentekoa tuotannossa.

Tutkimuksessa tunnistettiin myös haasteita, kuten tekoälyn käyttöönoton vaativat alkuinvestoinnit, erikoisosaamisen tarve ja tietoturvakysymykset. Näiden haasteiden ratkaiseminen edellyttää strategista lähestymistapaa ja tiivistä yhteistyötä teollisuuden ja teknologiatoimittajien välillä.

Tulevaisuuden tutkimuksessa tulisi keskittyä kehittyneiden koneoppimistekniikoiden käytännön sovelluksiin ja niiden vaikutuksiin tuotannon tehokkuuteen, joustavuuteen ja kestävyteen. Tämä edellyttää sekä teknologista innovointia että tiivistä yhteistyötä teollisuuden ja akateemisen maailman välillä. Jatkuva tutkimus ja kehitys ovat välttämättömiä, jotta tekoälyn tarjoamat mahdollisuudet voidaan hyödyntää täysimääräisesti.

LÄHTEET

- [1] Jarrahi, M. H. (2018) Artificial intelligence and the future of work: Human-AI symbiosis in organizational decision making. *Business horizons*. [Online] 61 (4), 577–586.
- [2] Elbasheer, M. et al. (2022) Applications of ML/AI for Decision-Intensive Tasks in Production Planning and Control. *Procedia Computer Science*. [Online] 2001903–1912.
- [3] Cañas, H. et al. (2022) A conceptual framework for smart production planning and control in Industry 4.0. *Computers & industrial engineering*. [Online] 173108659-.
- [4] Crew, B. (2020) Artificial intelligence. *Nature (London)*. [Online] 588 (7837), S101–S101.
- [5] Our World in Data. n.d. Annual patent applications related to AI, by status, World Verkkosivu. Viitattu 21.7.2024. <https://ourworldindata.org/grapher/ai-related-patents-applications-and-patents-granted?time=2010..latest>
- [6] Abbass, H. (2021) Editorial: What is Artificial Intelligence? *IEEE transactions on artificial intelligence*. [Online] 2 (2), 94–95.
- [7] Huang, M.-H. & Rust, R. T. (2018) Artificial Intelligence in Service. *Journal of service research: JSR*. [Online] 21 (2), 155–172.
- [8] Collins, C. et al. (2021) Artificial intelligence in information systems research: A systematic literature review and research agenda. *International journal of information management*. [Online] 60102383-.
- [9] Yu, Y. et al. (2024) Unleashing the power of AI in manufacturing: Enhancing resilience and performance through cognitive insights, process automation, and cognitive engagement. *International journal of production economics*. [Online] 270109175-.
- [10] Jordan, M. I. & Mitchell, T. M. (2015) Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science (American Association for the Advancement of Science)*. [Online] 349 (6245), 255–260.
- [11] Usuga Cadavid, J. P. et al. (2020) Machine learning applied in production planning and control: a state-of-the-art in the era of industry 4.0. *Journal of intelligent manufacturing*. [Online] 31 (6), 1531–1558.
- [12] Yu, C. et al. (2023) Reinforcement Learning in Healthcare: A Survey. *ACM computing surveys*. [Online] 55 (1), 1–36.
- [13] Mueller, J. P. & Massaron, L. (2019) *Deep learning for dummies*. 1st edition. Newark: Wiley.
- [14] Lehner, O. M. et al. (2022) Artificial intelligence based decision-making in accounting and auditing: ethical challenges and normative thinking. *Accounting, auditing & accountability journal*. [Online] 35 (9), 109–135.

- [15] Collins, C. et al. (2021) Artificial intelligence in information systems research: A systematic literature review and research agenda. *International journal of information management*. [Online] 60102383-.
- [16] Fan, H. et al. (2024) Embodied intelligence in manufacturing: leveraging large language models for autonomous industrial robotics. *Journal of intelligent manufacturing*. [Online]
- [17] Lödding, H. & Rossi, R. (2013) *Handbook of Manufacturing Control: Fundamentals, description, configuration*. 1. Aufl. [Online]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [18] Kapulin, D. V. & Russkikh, P. A. (2020) Analysis and improvement of production planning within small-batch make-to-order production. *Journal of Physics: Conference Series*. [Online] 1515 (2), 22072-.
- [19] Wen, H. et al. (2017) An optimization algorithm for integrated remanufacturing production planning and scheduling system. *Chaos, solitons and fractals*. [Online] 10569–76.
- [20] Hung, Y.-F. et al. (2013) Real-time capacity requirement planning for make-to-order manufacturing with variable time-window orders. *Computers & industrial engineering*. [Online] 64 (2), 641–652.
- [21] Kazemi Zanjani, M. et al. (2011) Production planning with uncertainty in the quality of raw materials: a case in sawmills. *The Journal of the Operational Research Society*. [Online] 62 (7), 1334–1343.
- [22] Pochet, Y. (2006) *Production Planning by Mixed Integer Programming*. 1st edition. Netherlands: Springer Nature.
- [23] Duan, L. & Da Xu, L. (2021) Data Analytics in Industry 4.0: A Survey. *Information systems frontiers*. [Online] 1–17.
- [24] Tao, F. et al. (2018) Data-driven smart manufacturing. *Journal of manufacturing systems*. [Online] 48157–169.
- [25] Raj, P. et al. (2020) *The Internet of Things and Big Data Analytics: Integrated Platforms and Industry Use Cases*. 1st edition. [Online]. Milton: CRC Press.
- [26] Usuga Cadavid, J. P. et al. (2020) Machine learning applied in production planning and control: a state-of-the-art in the era of industry 4.0. *Journal of intelligent manufacturing*. [Online] 31 (6), 1531–1558.
- [27] Bousdekis, A. et al. (2021) A review of data-driven decision-making methods for industry 4.0 maintenance applications. *Electronics (Basel)*. [Online] 10 (7), 828-.
- [28] Gabsi, A. E. H. (2024) Integrating artificial intelligence in industry 4.0: insights, challenges, and future prospects—a literature review. *Annals of operations research*. [Online]
- [29] Rahmani, M. et al. (2022) Towards smart production planning and control; a conceptual framework linking planning environment characteristics with the need for smart production planning and control. *Annual reviews in control*. [Online] 53370–381.
- [30] Chang, J. et al. (2022) Deep Reinforcement Learning for Dynamic Flexible Job Shop Scheduling with Random Job Arrival. *Processes*. [Online] 10 (4), 760-.
- [31] Estes, A. et al. (2023) Reinforcement learning applied to production planning and control. *International journal of production research*. [Online] 61 (16), 5772–5789.

[32] Oluyisola, O. E. et al. (2022) Designing and developing smart production planning and control systems in the industry 4.0 era: a methodology and case study. *Journal of intelligent manufacturing*. [Online] 33 (1), 311–332.