

Rasmus Hyypiä

TEHDASSIMULOINTI TYÖKALUNA VAL- MISTAVASSA TEOLLISUUDESSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Hasse Nylund
Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Rasmus Hyypiä: Tehdassimulointi työkaluna valmistavassa teollisuudessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2022

Tehdassimulointi on tuotannosuunnittelussa- ja ohjauksessa käytettävä työkalu, jossa tutkittavana olevasta järjestelmästä luodaan digitaalinen malli. Tälle mallille voidaan suorittaa testejä ja siihen voidaan tehdä muutoksia häiritsemättä varsinaisen järjestelmän toimintaa. Tehdassimulointi pohjautuu tapahtumapohjaiseen simulointiin (engl. Discrete event simulation, DES), jossa valmistusjärjestelmässä esiintyvät työvaiheet esitetään diskreetteinä tapahtumina, joiden välillä malli pysyy muuttumattomana. Työn tavoite on selvittää tehdassimuloinnin sovelluskohteita valmistavassa teollisuudessa, tutkia millaisia hyötyjä simuloinnilla voidaan näissä tapauksissa saavuttaa ja mitä haasteita sen käyttämiseen liittyy. Tämän lisäksi työn tavoite on selvittää, kuinka tyypillinen simulaatiotutkimus toteutetaan ja mistä vaiheista se koostuu.

Työ toteutetaan pääasiassa kirjallisuustutkimuksen muodossa. Työn teoriaosassa hyödynnetään vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita, konferenssijulkaisuja ja tehdassimulointiin liittyvää kirjallisuutta. Simuloinnin sovelluskohteita esitettäessä aineistona hyödynnetään myös tapaustutkimuksia, joiden osalta tuodaan esille niiden tavoitteet, tulokset ja saavutetut hyödyt. Sovelluskohteita tutkitaan ainoastaan tapahtumapohjaisen simuloinnin näkökulmasta, ja käyttökohteet rajoittuvat vain valmistavaan teollisuuteen. Sovelluskohteiden osalta keskitytään tarkemmin simuloinnin hyödyntämiseen valmistusteknisessä suunnittelussa ja operatiivisessa toiminnassa.

Simulaatiotutkimukselle saatiin määriteltyä päävaiheet, joista työssä tarkastellaan tarkemmin neljää: tutkimusongelman muodostamista, datan keräämistä, verifiointia ja validointia sekä implementointia ja tutkimuksen päättämistä. Vaiheisiin liittyviä haasteita tuotiin esille sujuvan simulaatiotutkimuksen toteuttamiseksi.

Tutkimustulokset osoittavat, että valmistavan teollisuuden yritys voi tehdassimuloinnin avulla tehostaa tuotannosuunnittelua- ja ohjaustaan, ja saavuttaa kilpailuetua muihin yrityksiin nähden. Simuloinnin avulla voidaan havaita tuotannon pullonkauloja ja vähentää niiden vaikutusta, tasapainottaa eräkokoja, vertailla erilaisia materiaalinkuljetusstrategioita tai optimoida tuotantoa energiankulutuksen näkökulmasta. Tämän lisäksi tuloksissa korostui tehdassimuloinnin visuaalisuus, joka auttaa sekä päätöksenteossa että yhteisymmärryksen luomisessa.

Avainsanat: Tehdassimulointi, tapahtumapohjainen simulointi, valmistava teollisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEHDASSIMULOINTI	3
2.1 Simuloinnin määritelmä	3
2.2 Simulointimallien luokittelu	3
2.3 Simulaatiotutkimuksen toteuttaminen	4
2.3.1 Tutkimusongelman muodostaminen	7
2.3.2 Datan kerääminen	8
2.3.3 Verifiointi ja validointi	8
2.3.4 Implementointi ja tutkimuksen päättäminen	10
3. SIMULOINNIN HYÖDYNTÄMINEN VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA	12
3.1 Joustavat valmistusjärjestelmät	13
3.2 Valmistustekninen suunnittelu	14
3.2.1 Pullonkaulojen havaitseminen	14
3.2.2 Valmistustekninen optimointi	15
3.3 Operatiivisen toiminnan analysoiminen	16
3.3.1 Reititysratkaisujen vertailu	16
3.3.2 Eräkoon määrittäminen	17
3.3.3 Ohjausmenetelmien testaaminen	18
3.4 Simuloinnin erikoiskohteita	19
3.4.1 Energiankulutuksen optimointi	19
3.4.2 Tulosten visualisointi ja ymmärryksen luominen	20
4. PÄÄTELMÄT	22
5. YHTEENVETO	24
LÄHTEET	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AGV	Automated Guided Vehicle, tavaroiden kuljettamiseen suunniteltu automaattisesti toimiva miehittämätön trukki
CNC	Computer Numerical Control, Tietokonejärjestelmällä numeerisesti ohjattava työstökone
CS	Continuous Simulation, jatkuva-aikainen simulointi
DES	Discrete Event Simulation, tapahtumapohjainen simulointi
FMS	Flexible Manufacturing System, joustava valmistusjärjestelmä
JIT	Just In Time, aikataulutuseriaate, jossa tuotteet pyritään valmistamaan juuri oikeaan aikaan
KET	Keskeneräinen tuotanto. Lukumäärä, joka kertoo jollain ajanhetkellä tuotannossa samanaikaisesti valmistettavana olevien keskeneräisten tuotteiden lukumäärän.

1. JOHDANTO

Valmistava teollisuus on nyky maailman selkäranka, ja sen valmistamat hyödykkeet luovat pohjan ihmisten moderneille elämäntavoille. Tällä hetkellä on meneillään neljäs teollinen vallankumous, jossa on keskeisessä roolissa asiakaskohtainen massakustomoitu valmistus. Asiakkaiden halu saada juuri heidän tarpeisiinsa räätälöityjä tuotteita tuo uusia haasteita valmistavalle teollisuudelle.

Neljänten teolliseen vallankumoukseen liittyy vahvasti sähköisten teknologioiden yleistymisen, jonka myötä ympärillä olevasta maailmasta on saatavilla dataa huomattavasti aikaisempaa enemmän. Tämä on johtanut monien datapohjaisten teknologioiden ja työkalujen yleistymiseen, joista yksi on työssä käsiteltävä tehdassimulointi. McGinnisin ja Rosen (2017) mukaan tehdassimulointiin liittyvää tutkimusta on esiintynyt ensimmäisen kerran jo 1960-luvulla. Kiinnostus tehdassimulointia kohtaan on kasvanut vuosien mitaan, ja tutkimuksissa on huomattavissa muutokset teoreettisesta käytännönläheisempään suuntaan. Tämä selittyy simulointia varten luotujen ohjelmistojen kehittymisen ja tietokoneiden laskentatehon kasvamisen myötä, jonka takia simulointitutkimusten toteuttaminen on halvempaa ja lähestyttävämpää. (McGinnis & Rose 2017)

Tehdassimuloinnissa tutkittavasta järjestelmästä, kuten kokonaisesta tehtaasta tai sen osasta, luodaan digitaalinen malli. Mallille voidaan suorittaa testejä ja vertailla erilaisia ratkaisuja häiritsemättä fyysisen järjestelmän tuotantoa. Valmistavassa teollisuudessa tehdassimulointia käytetään suunniteltaessa uusia järjestelmiä sekä tehtäessä muutoksia jo olemassa oleviin järjestelmiin. Tehdassimulointi tarjoaa tuotannonsuunnittelijoille työkalun päätöksenteon tueksi. (Carson 2005)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia tehdassimulointia ja sen sovelluskohteita valmistavassa teollisuudessa. Työssä tarkastellaan, millaisia hyötyjä tehdassimuloinnilla voidaan saavuttaa ja selvitetään, mitkä ovat sen suurimpia haasteita. Tehdassimulointi toteutetaan tyypillisesti projektiluontoisena simulaatiotutkimuksena, joten työssä esitellään tällaiselle tutkimukselle tyypilliset vaiheet ja käsitellään näihin vaiheisiin liittyviä haasteita.

Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Mitä tehdassimuloinnilla tarkoitetaan?

2. Miten tehdassimulointia hyödynnetään valmistavassa teollisuudessa?

3. Mitä haasteita simuloinnin käyttämiseen liittyy?

Työssä tutkitaan simuloinnin sovelluskohteita ainoastaan tapahtumapohjaisen simuloinnin (engl. Discrete event simulation, DES) näkökulmasta. Simuloinnin käyttökohteiden laajuuden takia tarkastelu keskittyy ainoastaan valmistavaan teollisuuteen, eikä esimerkiksi lääketeollisuuden tai liikenteen sovelluskohteita esitellä. Käyttökohteiden tarkastelu painottuu valmistavan teollisuuden sisällä joustaviin valmistusjärjestelmiin (engl. Flexible Manufacturing System, FMS), sillä FMS-järjestelmät mahdollistavat muun muassa useita erilaisia aikataulutus- ja reititysvaihtoehtoja, joiden tarkastelemisessa voidaan hyödyntää simulointia. FMS-järjestelmällä tarkoitetaan tyypillisesti hyllystöhissin ympärille rakennettua koneistavan teollisuuden valmistusjärjestelmää, mutta sillä voidaan kuvata muitakin valmistusjärjestelmiä, jotka ovat joustavia ja sisältävät korkean automaation tason (Rifai et al. 2016; Lapinleimu 2001, s. 125). Työssä tarkasteltavien käyttökohteiden esimerkit koostuvat molemmista edellä esitetyistä määritelmistä.

Työ toteutetaan pääasiallisesti kirjallisuustutkimuksena, jossa lähteinä hyödynnetään vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita, konferenssijulkaisuja ja tehdassimulointiin liittyvää kirjallisuutta. Lähteet ovat valtaosin kerätty Tampereen yliopiston Andor-tietokannasta, mutta myös Google Scholar- ja Knovel-tietokantoja on käytetty tutkimuksen tiedonhaun tukena.

Työn rakenne koostuu johdannon lisäksi neljästä luvusta. Toisessa luvussa käsitellään aiheen tarkastelun kannalta keskeistä teoriaa, käsitteistöä ja esitellään simulaatiotutkimukselle tyypillinen rakenne. Luvussa 3 tarkastellaan simuloinnin sovelluskohteita valmistavan teollisuuden eri osa-alueilla. Tämä toteutetaan teoreettisella tarkastelulla sekä käymällä läpi toteutettuja simuloinnin tapaustutkimuksia. Neljännessä luvussa vastataan tutkimuskysymyksiin, pohditaan simuloinnin soveltuvuutta valmistavaan teollisuuteen sekä potentiaalisia jatkotutkimuksen aiheita. Viimeinen luku sisältää työn yhteenvedon.

2. TEHDASSIMULOINTI

Tässä luvussa tutustutaan simuloinnin määritelmään ja keskeisiin käsitteisiin. Luvussa esitellään myös simulaatiomallien yleisimpiä luokittelutapoja ja simulaatiotutkimukselle ominaiset vaiheet.

2.1 Simuloinnin määritelmä

Simulointi on reaalimaailman prosessin tai järjestelmän jäljittelyä ajan kuluessa. Simuloinnissa luodaan keinotekoisia historiaa, jonka avulla voidaan tehdä päätelmiä todellisesta järjestelmästä. Sitä voidaan käyttää sekä uusien että jo toiminnassa olevien järjestelmien kuvaamiseen, analysoimiseen tai kysymään "mitä jos" -kysymyksiä. (Banks 2003) "Mitä jos" -kysymyksillä viitataan hypoteettisiin tilanteisiin, joita simuloinnin avulla voidaan tarkastella. Voidaan esimerkiksi tutkia uuden laiteinvestoinnin tai layoutin muutoksen vaikutusta tuotannon tehokkuuteen. Simulointi on kokeellinen lähestymistapa, joka ei tee päätöksiä käyttäjän puolesta, vaan on työkalu päätöksenteon tueksi. (Robinson 2014, s. 4)

White ja Ingalls (2020) määrittelevät simuloinnin puolestaan mallille tehtäväksi kokeiluksi. Malli jäljittelee tutkittavan järjestelmän keskeisiä ominaisuuksia, ja sitä tutkimalla voidaan ymmärtää järjestelmän toimintaa ja ratkaista ongelmia. He korostavat, että malli luodaan tiettyä tarvetta varten. Se ei ole täydellinen esitys todellisesta järjestelmästä, vaan yksinkertaistus, joka täyttää ne ominaisuudet, joita tavoitteiden saavuttamiseksi vaaditaan. Simulointia voidaan hyödyntää tilanteissa, jossa varsinaisen järjestelmän tutkiminen häiritsisi tuotantoa, olisi vaarallista tai se veisi liian kauan aikaa. (White & Ingalls 2020)

2.2 Simulointimallien luokittelu

Simulaation ja mallin käsitteet ovat laajoja, joten niitä täytyy tarkasteltavan järjestelmän mukaan jakaa yksityiskohtaisempiin luokkiin. Simulaatiomallista puhuttaessa viitataan järjestelmän tai prosessin esitykseen, joka ottaa huomioon ajan kuluessa tapahtuvat muutokset. (Carson 2005) Simulaatiot voidaan jakaa niiden aikatarkastelun perusteella staattisiin ja dynaamisiin simulaatioihin. Dynaaminen simulaatio vastaa edellä mainitun simulaatiomallin määritelmää, kun taas staattisessa simulaatiossa järjestelmää tarkastellaan vain tietyssä ajanhetkessä. (Robinson 2014 s. 2; Banks 1998) Kandidaatintyössä keskitytään tarkastelemaan asioita dynaamisen simulaation kannalta, sillä ajan

sisällyttäminen on keskeistä muun muassa materiaalivirtojen ja laitteiden toiminnan seuraamisen kannalta.

Dynaamiset simulaatiomallit voidaan edelleen jakaa tapahtumapohjaiseen simulointiin ja jatkuvaan simulointiin (engl. Continuous simulation, CS). Tapahtumapohjaisessa simuloinnissa mallin tila esitetään sarjana tapahtumia, joiden välillä se pysyy muuttumattomana. Tapahtuma määritetään välittömäksi hetkeksi, jolloin systeemin tila muuttuu. (Robinson 2014, s. 15) Työssä tarkasteltava tehdassimulointi on tapahtumapohjaista simulointia, sillä valmistusjärjestelmät ovat luonteeltaan diskreettejä. Diskreettejä tuotannon tapahtumia ovat esimerkiksi materiaalin saapuminen tehtaaseen, työstämisen aloittaminen ja lopettaminen työpisteessä ja lopulta valmiin tuotteen poistuminen tehtaasta. Tehdassimuloinnin kannalta näiden tapahtumien välinen aika ei ole tärkeää, joten simulointikelloa nopeuttamalla voidaan pitkiäkin ajanjaksoja simuloida hyvin nopeasti. (Lapinleimu et al. 1997) Jatkuvassa simuloinnissa puolestaan mallin tilaa kuvataan yhtälöiden avulla, joiden arvot muuttuvat jatkuvasti ajan kuluessa (Alan & Pritsker 1998).

Jako voidaan tehdä myös stokastisen ja deterministisen simulaation välille sen mukaan, sisältääkö simulaation ulostulo satunnaisuutta. Deterministisen mallin ulostulo olisi simulaatiokertojen välillä identtinen. Reaalimaailman järjestelmiä tutkittaessa mallit ovat käytännössä aina stokastisia, jos niitä tarkastellaan riittävän yksityiskohtaisesti. Tapahtumat, kuten materiaalien saapumisajat ja laitteiden korjausajat, noudattavat tilastollisia jakaumia, sillä ne sisältävät satunnaismuuttujia, kuten varianssin. Simulaation yhden tapahtuman sisältäessä satunnaisuutta koko simulaation ulostulo on satunnainen. (Carson 2005)

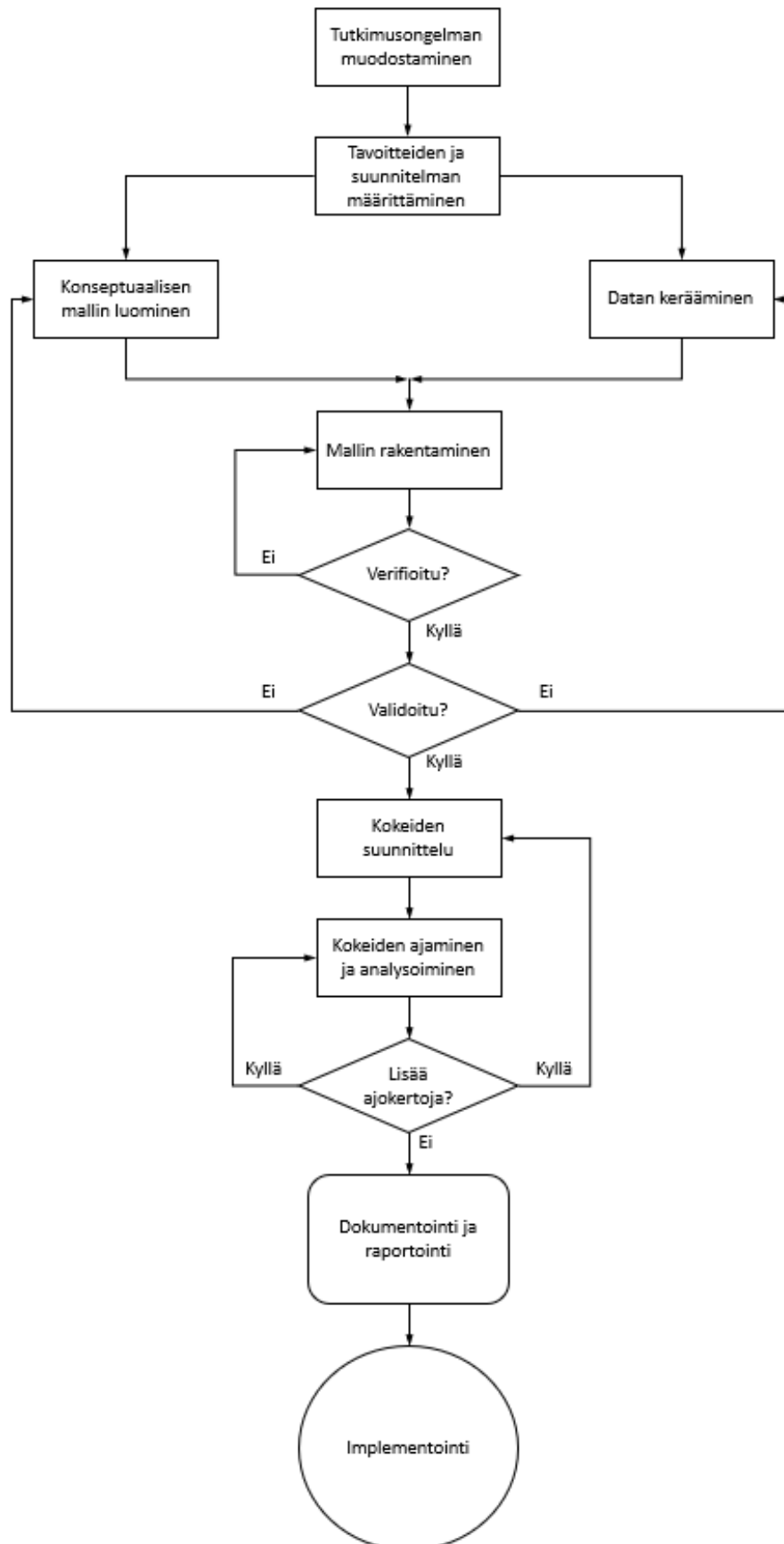
2.3 Simulaatiotutkimuksen toteuttaminen

Simulaatiotutkimuksen toteuttaminen on laajamittainen prosessi, joka vaatii laajaa ymmärrystä monista eri tieteenaloista, kuten tietojenkäsittelystä, tilastotieteistä ja insinööritieteistä (Balci 1998). Tästä syystä simulaatiotutkimus toteutetaan työryhmässä yksittäisen henkilön sijaan. Carsonin (2005) mukaan työryhmän keskeisiä rooleja on seuraavanlaisia:

- päätöksentekijät, jotka koostuvat simulaatiotutkimuksen asiakkaiden johdonhenkilöistä
- insinöörit ja muut henkilöt, jotka ovat päivittäin tekemisissä tutkittavan järjestelmän kanssa
- yrityksen omat tai ulkopuoliset järjestelmäsuunnittelijat, jotka suunnittelevat järjestelmään tehtävää muutosta

- simulointianalyttikko, joka työskentelee simulointiohjelmiston parissa ja muodostaa simulaatiomallin työryhmän muiden jäsenten ohjeistamana.

Useiden ihmisten sitominen tutkimukseen synnyttää huomattavia kustannuksia. Tutkimusten kestot voivat vaihdella paljon, mutta keskimääräisesti ne valmistuvat 1–3 kuukaudessa (Cochran et al. 1995). Kustannuksia syntyy myös tarvittavien laitteiden sekä simulaatio-ohjelman lisenssin ostamisesta. Kokonaiskustannuksia onkin tärkeä vertailla simuloinnista saatavien hyötyjen kanssa. (Robinson 2014, s. 59) Simulaatiotutkimuksesta syntyvät kustannukset ovat kuitenkin alhaiset verrattaessa varsinaisen järjestelmän investointikustannuksiin. Valinta simuloinnin käyttämiseen perustellaan usein sillä, että muutoksia on halvempi tehdä suunnitteluvaiheessa tietokoneella kuin fyysiseen järjestelmään käytännössä. Seuraavissa alaluvuissa keskitytään simulaatiotutkimuksen neljään keskeiseen vaiheeseen: tutkimusongelman muodostamiseen, datan keräämiseen, verifiointiin ja validointiin sekä päätelmiin ja tulosten soveltamiseen. Simulaatiotutkimukselle tyypillisiä vaiheita havainnollistetaan kuvassa 1.



Kuva 1: Simulaatiotutkimuksen vaiheet, muokattu lähteestä (Banks 1998, s. 16)

2.3.1 Tutkimusongelman muodostaminen

Tutkimus alkaa havaitun ongelman kuvauksella, joka voi olla esimerkiksi odotettua hitaammat tuotannon läpimenoajat. Ongelman taustalla oleva syy on usein tutkimuksen alussa epäselvä, joten täsmällisen tutkimusongelman muodostamiseksi on perehdyttävä huolellisesti tutkittavaan järjestelmään. Ymmärryksen pohjalta simulaatiomallille luodaan tavoitteita, jotka sen tarvitsee täyttää. Simulaatiotutkimuksen hallitsemattoman laajentumisen estämiseksi malliin ei kannata sisällyttää yksityiskohtia, jotka eivät ole asetettujen tavoitteiden kannalta tärkeitä. (Carson 2005) Puutteellinen tavoitteiden määrittäminen on yleisimpiä syitä epäonnistuneeseen simulaatiotutkimukseen. Simuloinnin tarkoitus on tukea päätöksentekoa, jossain todellisessa ongelmassa ja ilman selkeää tavoitetta, simulointi jää helposti päämäärättömäksi. Tutkimukselle voidaan asettaa useita tavoitteita, mutta siinä tapauksessa tavoitteet ovat tärkeä asettaa tärkeysjärjestykseen ajankäytöllisistä syistä. (Lapinleimu et al. 1997, s. 331–332)

Simulaatiotutkimuksen alussa on tärkeää panostaa simulointiryhmän väliseen kommunikointiin, jotta kaikki ymmärtävät ja ovat yhteisymmärryksessä muodostetusta tutkimusongelmasta. Tutkimusongelman muodostamiseen kannattaa panostaa, vaikka sitä voidaan joutua muotoilemaan uudelleen tutkimuksen edetessä. Varsinaisen simuloinnin suorittaa simulaatioanalyytikko, joka voi olla työntekijä tutkimuksen kohteena olevassa yrityksessä, mutta tyypillisesti analyytikko työskentelee simulointiin erikoistuneessa yrityksessä, joka tarjoaa osaamistaan palveluna muille yrityksille. (Banks 1998)

Ennen simulaatiomallin rakentamista on tutkittava myös vaihtoehtoisia ongelmanratkaisutekniikoita. Tekniikoita vertaillaan arvioimalla niiden aiheuttamia kustannuksia potentiaalisten hyötyjen kanssa. Tutkimusongelmaa muotoiltaessa kannattaakin välttää tilanne, jossa ongelmaa ajatellaan vain yhden ratkaisutekniikan kannalta. Tämä voi johtaa kalliisiin ratkaisuihin tai vääränlaisen ongelman muodostamiseen. (Balci 1998, s. 338) Simulointitutkimuksen kustannukset voivat kasvaa suuriksi ja sen toteuttaminen on aikaa vievää, joten on tilanteita, joissa vaihtoehtoisten tekniikoiden käyttäminen on järkevämpää. Tällaisia ovat esimerkiksi yksinkertaiset tuotannon ongelmat, jotka voidaan selvittää analyttisillä malleilla tai käyttämällä maalaisjärkeä. Yksinkertaisten ongelmien ratkaisemisesta saatava hyöty voi olla rajallista, jolloin simuloinnin käyttö ei myöskään ole perusteltua. On tilanteita, joissa testien suorittaminen varsinaisessa järjestelmässä voi olla mahdollista ilman suurempia seurauksia järjestelmän toimintaan, jolloin tämä menettelytapa voi saavuttaa tutkimuksen tavoitteet huomattavasti simulointia nopeammin. (Norman & Banks 1997 s. 748–750) Malega et al. 2017 toteaa vaihtoehtoisten tekniikoiden

käyttömahdollisuuksien olevan kuitenkin rajallisia tarkasteltaessa nykypäivän monimutkaisia valmistusjärjestelmiä.

2.3.2 Datan kerääminen

Datan kerääminen alkaa heti tutkimusongelman muodostamisen jälkeen, kun mallin keskeiset piirteet ovat tiedossa. Tämänhetkisen ymmärryksen pohjalta luotuun fyysisen järjestelmän abstraktioon viitataan termillä konseptuaalinen malli, sillä mallin piirteet ovat käsitteellisellä tasolla vain simulointianalyytikon mielessä. Konseptuaalinen malli asettaa lähtökohdat fyysisestä järjestelmästä kerättävälle datalle, jonka pohjalta tietokonepohjainen simulaatiomalli voidaan luoda. Dataa tarvitaan mm. laitteiden käsittely-, asetus- ja huoltoaikojen sekä materiaalien saapumisaikojen määrittämistä varten. Valtaosa kerättävästä datasta on edellisten esimerkkien mukaista kvantitatiivista eli numeerista dataa. Tämän lisäksi myös kvalitatiivinen data tarvitsee ottaa huomioon. Se sisältää esimerkiksi tuotannonohjaamiseen päättelysääntöjä, kuten automaattiohjattujen kulkuneuvojen (engl. Automated Guided Vehicle, AGV) reittejä, jotka voidaan esittää kuvien tai sanojen avulla. (Robinson 2014, s.95–96)

Data voidaan jakaa kolmeen luokkaan: A, B ja C sen keräämistavan perusteella. Luokan A data on välittömästi saatavilla, koska se on kerätty aikaisemmin. Tällaista dataa on tuotantojärjestelmien keräämä historiadata järjestelmän tilasta sekä mahdollisesti aikaisemmissa tutkimuksissa kerätty data, jota voidaan hyödyntää simulaatiomallin kehittämisessä. Tyypin B data ei ole heti saatavilla, vaan se saadaan haastattelemalla tutkittavan järjestelmän parissa toimivia henkilöitä tai erillisten seurantajärjestelmien avulla. C-luokan dataa ei pystytä keräämään järjestelmästä eikä sitä ei ole saatavilla. Tällaista dataa ilmenee etenkin uusia järjestelmiä suunniteltaessa, jolloin historiadataa ei ole olemassa. Data voi olla tutkimuksen kannalta saavuttamattomissa, jos sitä ei ehditä keräämään tutkimuksen rajallisten aikataulujen vuoksi. Näissä tilanteissa voidaan kerätä korviketietoja samankaltaisesta järjestelmästä tai luottaa asiantuntijoiden antamiin arvioihin. (Robinson 2014, s.97–98)

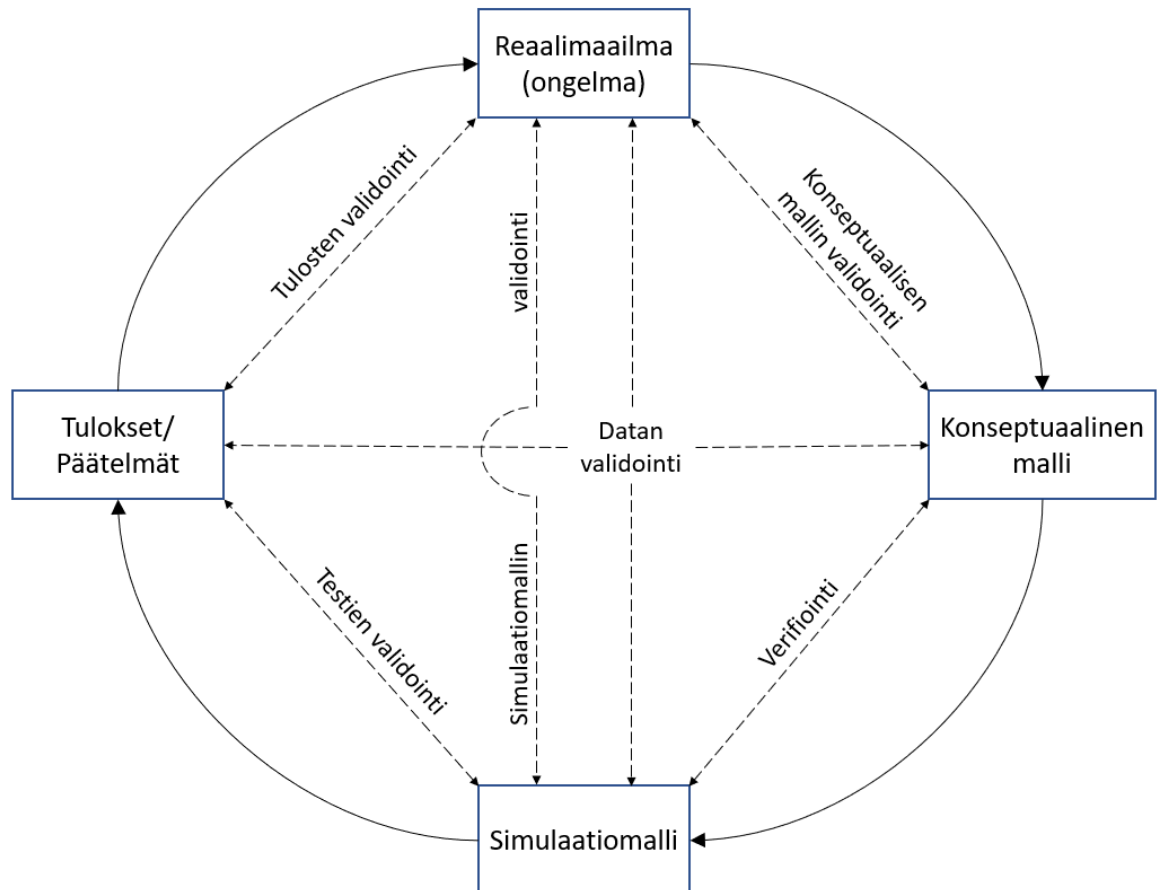
2.3.3 Verifiointi ja validointi

Simulaatiotutkimuksen kannalta on tärkeää, että kehitetty malli on tarpeeksi luotettava. Mallin luotettavuutta arvioidaan suorittamalla sille testejä. Mitä enemmän suoritetaan testejä, jotka eivät kykene osoittamaan mallia vääräksi, sitä luotettavampana mallia voidaan pitää. Verifiointi ja validointi ovat testausmenetelmiä, jolla riittävä tarkkuus

varmistetaan. (Robinson 2014, s. 222) Verifiointi määritellään tutkimuksen vaiheeksi, jossa osoitetaan, että simulaatiomalli on luotu riittävällä tarkkuudella konseptuaalisen mallin pohjalta. Validoinnissa puolestaan osoitetaan, että malli käyttäytyy riittävällä tarkkuudella vastaamaan sille asetettuihin tavoitteisiin. (Balci 1998)

Validointia käytetään simulaatiotutkimuksen eri vaiheissa. Näistä konseptuaalisen mallin validointi on abstraktein, koska sille ei voida suorittaa varsinaisia testejä. Konseptuaalisen mallin validointi voi sisältää tutkittavan järjestelmän asiantuntijoiden kanssa keskustelua, jotta malliin osataan sisällyttää tutkimukselle keskeiset asiat ja kaikki tutkimuksen osapuolet ovat näistä asioista yhteisymmärryksessä. Simulaatiomallin validointi sisältää usein mallin vertailua reaalijärjestelmän kanssa. Tämä tarkoittaa esimerkiksi suorituskyvyn mittareiden, kuten läpimenoajan tai kokonaistuotannon arvojen vertailua. Simulaatiomallin ja reaalijärjestelmän pitäisi käyttäytyä vastaavasti, jos niitä vertaillaan samankaltaisissa olosuhteissa. (Robinson 2014, s. 214–215) Simulaatiomallissa käytettävä data täytyy myös validoida, sillä epätarkat lähtötiedot aiheuttavat virhettä simulaation tuloksessa. Tämä voidaan toteuttaa tutkimalla datalähteiden luotettavuutta sekä etsimällä datasta epä johdonmukaisuuksia. (Robinson 1999)

Verifiointi ja validointi ovat toistuvia tapahtumia, sillä simulaatiotutkimus on luonteeltaan iteratiivinen. Jos simulaatiomallin todetaan olevan liian epätarkka sen käyttötarkoitusta varten, täytyy siihen lisätä yksityiskohtia. Näiden yksityiskohtien lisääminen edellyttää tutkimuksen aikaisempiin vaiheisiin palaamista ja vaiheiden uudelleen verifiointia ja validointia. (Robinson 2014, s. 212) Simulaatiotutkimuksessa tapahtuvaa erityyppistä verifiointia ja validointia havainnollistetaan kuvassa 2.



Kuva 2: Verifioinnin ja validoinnin välisiä yhteyksiä simulaatiomallin käyttämisen eri vaiheissa, muokattu lähteestä (Robinson 2014, s. 211)

2.3.4 Implementointi ja tutkimuksen päättäminen

Simulointiprojektin viimeinen vaihe on implementointi, joka voidaan määrittää kolmella eri tavalla. Implementoinnilla voidaan viitata fyysiseen järjestelmään tehtävään konkreettiseen muutokseen, mallin implementoimiseen tai simulaatiotutkimuksesta saatuun ymmärrykseen, jota voidaan hyödyntää järjestelmän kehittämisessä. Mallin implementoinnilla viitataan mallin luovuttamiseen asiakkaalle, jolloin he voivat tehdä sille omia kokeita. Simulaatiomallit, jotka kehitetään toistuvan päätöksenteon, kuten tuotannon aika-auluttamisen tueksi, kuuluvat tähän luokkaan. Suuret laiteinvestoinnit toteutetaan tyypillisesti simulaatiotutkimuksen päätyttyä, mutta tutkimuksen aikana saatuja oivalluksia ja ymmärrystä voidaan hyödyntää myös tutkimuksen ollessa käynnissä. (Robinson s. 201–203) Simulaatiotutkimusta pidetäänkin onnistuneena vain, jos se tuottaa päätöstentekijöiden mielestä riittävän uskottavan ratkaisun, joka lopulta implementoidaan. (Balci 1998; McGuire 1998)

Implementointi vaatii tuekseen riittävää dokumentointia ja raportointia. Onnistunut raportointi lisää tulosten soveltamisen todennäköisyyttä, joten se on hyvä tehdä sekä suullisesti että kirjallisesti. Suullisessa osiossa keskitytään suositusten yksityiskohtaiseen läpikäymiseen, käyttäen apuna malliin pohjautuvia animaatiota sekä numeerisia- ja graafisia tuloksia. Kirjallisessa osiossa esitetään puolestaan tiiviisti tutkimuksen tavoite, saadut tulokset ja niiden pohjalta tehdyt päätelmät ja suositukset. (Lapinleimu et al. 1997) Raportin tarkoitus on kommunikoida simulaatiotutkimuksen tuloksia päätöksentekijöille, joten raportissa pitää välttää ylimääräistä ammattikielen käyttöä, jotta asiakkaat varmasti saavat selkeän kuvan tutkimuksen tuloksista (Balci 1990).

Raportoinnin tulosten esittämisessä nousi esille myös kaksi vastakkaista näkemystä. Normanin ja Banksin (1998) mielestä simulointianalyttikon tulee toimia neutraalina tulosten esittäjänä, joka ei puhu implementoinnin puolesta tai sitä vastaan. Musselman (1998) sanoo puolestaan, että simulointianalyttikon on tärkeää tarttua kaikkiin tilaisuuksiin, jossa voi tuoda esille tutkimuksen positiivisia puolia ja asiakkaalle täytyy korostaa simuloinnin tuomaa lisäarvoa.

Tutkimuksen kannalta onnistuneessa implementoinnissa varsinaisen toteutuksen tarvitsee vastata tutkimuksen tulosten pohjalta suositeltua järjestelmää. Muuten ei voida tietää johtuvatko mahdolliset erot simulaatiomallin ja varsinaisen järjestelmän välillä vain epätarkasta implementoinnista, ovatko olosuhteet muuttuneet vai onko simuloinnissa tehty virheitä. (Lapinleimu et al. 1997) Suositusten ymmärtäminen on tärkeää, sillä simulointianalyttikko siirtyy loppuraportin jälkeen usein eri tehtäviin ja implementointi jää päätöksentekijöiden vastuulle.

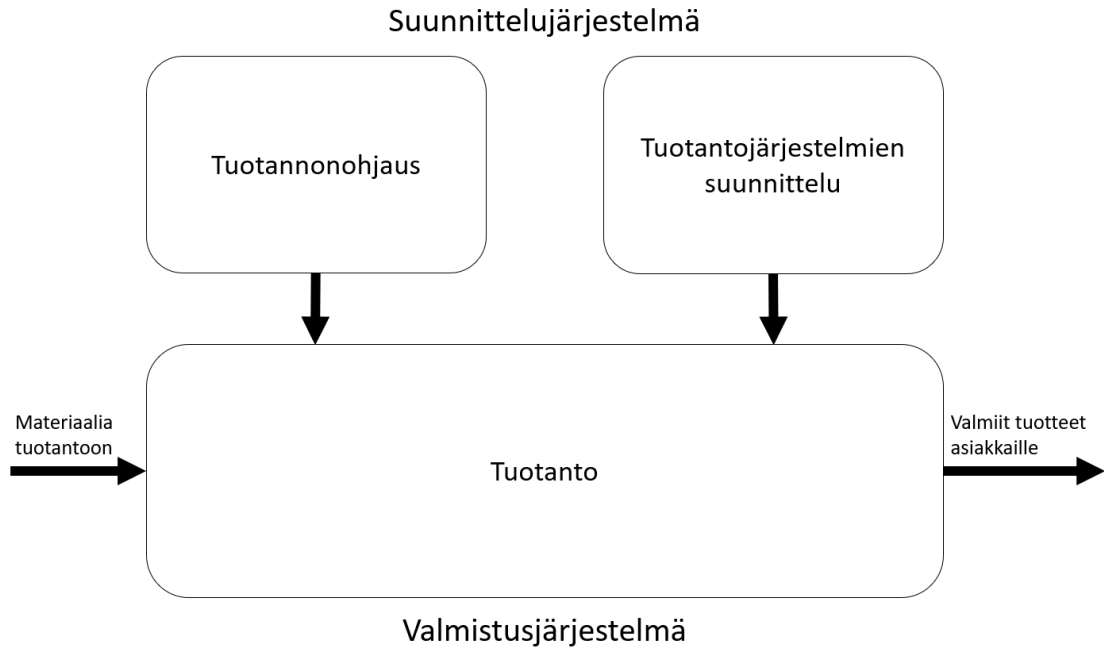
Dokumentointi on tärkeä osa mitä tahansa tutkimusta ja se sisältää tietoa tutkimuksen kaikista vaiheista. Se auttaa tutkijaa seuraamaan tutkimuksensa etenemistä ja mahdollistaa muiden henkilöiden yksityiskohtaisen perehtymisen tutkimukseen. Tämä mahdollistaa tutkimuksen mahdollisen jatkamisen tulevaisuudessa ja se voi toimia apuna muille tutkimuksille. (Robinson 2014, s. 133–134)

3. SIMULOINNIN HYÖDYNTÄMINEN VALMISTAVASSA TEOLLISUUDESSA

Simulaation hyödyntämiselle valmistavassa teollisuudessa on useita syitä. Luvussa 2.3.1 mainittiin simulaatiomalleille vaihtoehtoisten analyttisten mallien olevan riittämättömiä nykyajan monimutkaisten järjestelmien kuvaamiseen. Rohrer (1998) toteaa, että järjestelmien monimutkaisuudesta huolimatta valmistavan teollisuuden järjestelmät ovat usein selkeästi määriteltäviä ja niissä hyödynnetään runsaasti automaatiota, joka on edullista simulaation käytön kannalta. Valmistava teollisuus on lisäksi hyvin kilpailullinen toimiala, joten yritykset käyttävät kaikkia mahdollisia tekniikoita pysyäkseen kilpailijoidensa edellä (Rohrer 1998; Renna & Ambrico 2015).

Seuraavissa luvuissa esitellään simuloinnin teoreettisia käyttökohteita valmistavan teollisuuden eri osa-alueilla sekä tarkastellaan tapaustutkimuksia simuloinnin varsinaisista toteutuksista. Jako erilaisiin osa-alueisiin pohjautuu kuvassa 3 havainnollistettuun perustuotantojärjestelmän malliin. Tuotantojärjestelmä voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan. Valmistusjärjestelmään, jossa tapahtuu varsinainen jalostava työ sekä suunnittelujärjestelmään, jonka tarkoitus on varmistaa valmistusjärjestelmän sujuva toiminta. Seuraavissa alaluvuissa käsiteltävät simuloinnin sovelluskohteet keskittyvät suunnittelujärjestelmään. Simuloinnin hyötyjä visuaalisena työkaluna käsitellään tämän lisäksi omassa luvussaan.

Tuotantojärjestelmien suunnittelu ja toiminnanohjaus voidaan erottaa toisistaan niiden toteutuksen perusteella. Tuotantojärjestelmien suunnittelu toteutetaan ennen varsinaista valmistusvaihetta ja sen on tarkoitus luoda valmiudet tuotannon toiminnalle. (Lapinleimu et al. 1997, s. 299) Tuotannonohjaus on puolestaan operatiivista toimintaa, jota suoritetaan samanaikaisesti tuotannon kanssa. Sen tarkoituksena on kommunikoida yrityksen sidosryhmien, kuten asiakkaiden ja materiaalintoimittajien kanssa, jotta tuotanto toteutetaan sujuvasti ja asiakkaat saavat tilauksensa ajoissa. (Lapinleimu et al. 1997, s. 191–192)



Kuva 3: Perustuotantojärjestelmän malli, muokattu lähteestä (Lapinleimu 1997, s. 15)

3.1 Joustavat valmistusjärjestelmät

Asiakkaiden halu saada heille räätälöityjä tuotteita asettaa rasitteita suunnittelujärjestelmälle. Tuotannon valmistusjärjestelmältä vaaditaan joustavuutta ja tehokkuutta, jotta se kykenee muuttumaan asiakastarpeiden pohjalta sekä vastaamaan kysyntään. Joustava valmistusjärjestelmällä kuvataan tyypillisesti hyllystöhissin ympärille rakennettua CNC-koneita (engl. Computer Numerical Control) käyttävään koneistavan teollisuuden valmistusjärjestelmään, mutta sillä voidaan kuvata muitakin valmistusjärjestelmiä, jotka ovat joustavia ja sisältävät korkean automaation tason (Rifai et al. 2016; Lapinleimu 2001, s. 125) Korkean automaatiotason järjestelmässä työntekijöiden toiminnan tahdilla ja sen muutoksilla ei ole ulkoapäin havaittavaa vaikutusta järjestelmän toimintaan. Ihmisellä on edelleen arvoa kyseisessä järjestelmässä, mutta ihmisen rooli on vain muuttunut varsinaisen jalostavan työn tekemisestä enemmän valvovaan ja valmistelevaan rooliin. (Lapinleimu 2001, s.125)

FMS-järjestelmän joustavuus syntyy sen sisältämistä työkoneista, jotka toimivat omassa rytmisään ja kykenevät suorittamaan erilaisia työtehtäviä, automaattisesta varastojärjestelmästä, josta kappaleet kuljetetaan työpisteille ja kokonaisuutta hallitsevasta tietokonepohjaisesta ohjausjärjestelmästä. Valmistuksessa voi olla työvaiheita, joissa työntekijät tekevät tarkistuksia tai muita toimenpiteitä, joita ei ole automatisoitu, jolloin

vaihtopöytäjärjestelmällä kappale saadaan varastosta työntekijän saataville. FMS-järjestelmässä ylläpidetään määrätyn suuruista automaattisesti vaihdettavien kappaleiden varastoa, joka sallii miehittämättömiä jaksoja tuotannossa. (Lapinleimu 2001, s.128) Tämän avulla voidaan saavuttaa ympärivuorokautinen tuotanto ilman, että työntekijöiden tarvitsisi työskennellä vuorokauden ympäri.

FMS-järjestelmän joustavuuden käänköpuolena on järjestelmän aikatauluttamisen monimutkaisuus. Valmistusprosessin kannalta tuotannon koneiden järjestyksellä ei ole merkitystä, joten materiaalivirtojen mahdolliset vaihtoehdot moninkertaistuvat. Materiaalivirtojen lisäksi joustavissa tuotantojärjestelmissä valmistettavien tuotevariaatioiden määrä on monissa tapauksissa laajempi, joka lisää myös aikatauluttamisen mahdollisuuksia. Järjestyksen valintaan liittyvän optimoinnin on esitetty olevan NP-vaikea ongelma, jossa optimaalisen ratkaisun löytäminen tutkittavan järjestelmän koon kasvaessa vaikeutuu eksponentiaalisesti. Optimointi toteutetaan erilaisilla algoritmeilla ja simulointia hyödynnetään ratkaisujen verifiointiin ja visuaaliseen esittämiseen. (Rifai et al. 2016)

3.2 Valmistustekninen suunnittelu

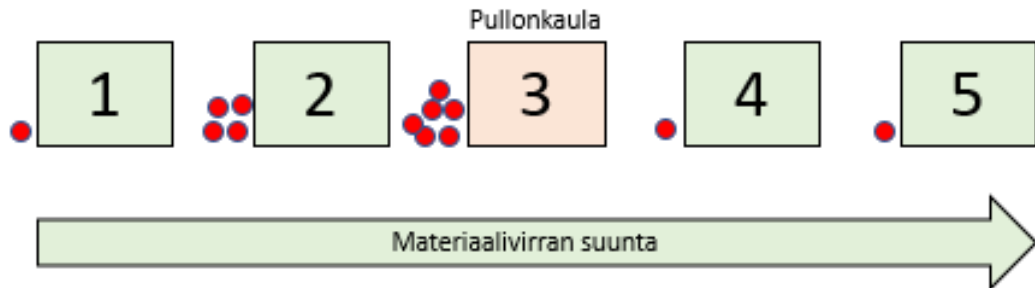
Valmistustekninen suunnittelu keskittyy muun muassa valmistusmenetelmien, työkoneiden ja solun sisäisen layoutin valitsemiseen. Valintojen välistä vertailua varten tarvitsee määrittää suoristuskvyn mittareita, joista tyypillisiä ovat kokonaistuotanto tietyllä ajanjaksolla, keskeneräinen tuotanto (KET), eli tuotannossa samanaikaisesti olevien kappaleiden lukumäärä ja tuotteen keskimääräinen läpimenoaika. (Lapinleimu et al. 1997, s. 308)

Seuraavissa alaluvuissa esitetään, miten tuotannossa olevia ongelmapisteitä eli pullonkauloja voidaan havaita simuloimalla, ja miten niiden vaikutusta voidaan lievittää. Valmistusteknisiä ratkaisuja, joissa on käytetty simulointia käydään myös läpi kahden taustatutkimuksen avulla.

3.2.1 Pullonkaulojen havaitseminen

Pullonkaulojen havaitseminen on keskeinen osa tuotannon tehokkuuden optimoimisesta. Pullonkaula on jokin järjestelmän osa, valmistavassa teollisuudessa tyypillisesti yksittäinen työpiste tai kone, jonka rajallinen kapasiteetti rajoittaa koko järjestelmän tuotantoa. Tämän lisäksi pullonkaula synnyttää varastoja sitä edeltäville työasemille, sillä se ei pysty vastaamaan niiden työtahtiin. (Kikolski 2016) Määritelmällisesti jokin työasema on aina pullonkaula, sillä kuormitusta on lähes mahdotonta tasoittaa täysin kaikkien työpisteiden välillä. Pullonkaulan lievittämisen tarkoituksena onkin poistaa merkittävimmän

pullonkaulan vaikutus, jolloin tuotanto muuttuu tasaisemmaksi eri työasemien välillä. Kuvassa 3 havainnollistetaan, miten pullonkaula vaikuttaa tuotantojärjestelmään.



Kuva 4: Pullonkaula yksinkertaisessa tuotantolinjassa, muokattu lähteestä (Kikolski 2016)

Li et al. (2020) ovat koonneet tyypillisiä havainnointikeinoja, joiden perusteella tuotannon pullonkaula on:

- korkeimman käyttöasteen omaava työasema
- työasema, jolla on pisin keskimääräinen käsittelyaika
- suurinta puskuria seuraava työasema
- eniten estetyn laitteen jälkeinen työasema
- järjestelmän suorituskyvyn kannalta herkin työasema.

3.2.2 Valmistustekninen optimointi

Pullonkaulan havaitsemisen jälkeen tarvitsee suorittaa toimenpiteitä, sen vaikutuksen lieventämiseksi. Valmistustekniseltä kannalta tämä voidaan toteuttaa lisäämällä pullonkaula-asemien määrää, kasvattamalla puskurikapasiteettia pullonkaulan edessä tai tehostamalla pullonkaulakoneen toimintaa. Tuotannon tehostaminen on aina kustannuskysymys, joten ratkaisu tarvitsee määrittää tapauskohtaisesti. (Li et al. 2020) Rinnakkaisen aseman lisäämistä pullonkaulakoneen rinnalle voidaan pitää kustannustehokkaana ratkaisuna, mutta sitä rajoittaa usein tehtaiden rajallinen tilanmäärä. Tuotantolaitteen vaihtaminen suorituskykyisempään voi vastaavasti tasoittaa tuotantoa, mutta taloudellisista syistä saatetaan laite vaihtaa vasta vanhemman laitteen käyttöään päätyttyä.

Kikolski (2016) muodosti tutkimuksessaan tehdassimulointiohjelmalla yksinkertaisen neljästä työkoneesta koostuvan tuotantolinjan pullonkaulojen analysoimista varten. Mallin rakentamista varten varsinaisesta järjestelmästä kerättiin tuotannon aikaista

materiaalivirtaa koskevia tietoja. Tuotantolinjaa simuloitiin kahdeksan tunnin ajalta, tyypillisen työvuoron keston mukaisesti. Kokonaistuotanto tältä ajalta oli alkutilanteessa 541 yksikköä. Tuotantolinjan koneiden suorituskykyä analysoitiin pullonkaulan löytämiseksi ja pullonkaulaksi tunnistettiin kone, jonka käyttöaste oli suurin ja sitä edeltävää kone oli pisimmän aikaa estettynä. Pullonkaulan vaikutuksen lieventämiseksi ehdotettiin vuoroitöihin siirtymistä, laaduntarkistuksen tiukentamista, jotta pullonkaulassa ei syntyisi hukkakappaleita tai pullonkaulavaiheen ulkoistamista. Lieventämiskeinoksi valikoitui kuitenkin rinnakkaisen työkoneen lisääminen tuotantolinjaan. Tämä ei täysin poistanut pullonkaulan vaikutusta, mutta kuormitukset tasoittuivat huomattavasti työkoneiden välillä ja kokonaistuotanto kasvoi 862 yksikköön. Tutkimuksessa todetaan, että simulointi on hyödyllinen työkalu erilaisten ratkaisujen toimivuuden vahvistamisessa, mutta se ei kuitenkaan sulje pois muiden tuotannosuunnittelun työkalujen käyttämistä. (Kikolski 2016)

Li et al. (2020) hyödynsi tutkimuksessaan simulointia lentokoneiteollisuuden komposiittituotteiden käsittely- ja testausjärjestelmän optimoimisessa. Tutkittava järjestelmä muodostui useista peräkkäisistä työpisteistä sekä nostureista ja liukuhihnoista, joiden avulla tuotteet virtasivat työpisteeltä toiselle. Simulaatiomallin luomista varten kerättiin lähtötietoja tutkittavan järjestelmän eri osista, joihin kuului muun muassa työpisteiden prosessointiajat, sekä materiaalia kuljettavien laitteiden ominaisuuksia. Mallin rakentamisen helpottamiseksi tehtiin yksinkertaistuksia. Järjestelmä oli automatisoitu ja koneiden ajateltiin olevan vakaita, joten työajat esitettiin vakioina. Malli rakennettiin Siemensin Plant simulation -ohjelmalla ja simulaation animaatiota tarkastelemalla varmistuttiin, että simulaation logiikka vastaa reaali maailman järjestelmän toimintalogiikkaa. Mallin työkoneille luotiin luvussa 3.1.1 esiteltyjen tuntomerkkien perusteella suorituskyvyn mittareita. Pullonkaulaksi tunnistettiin kone, jonka prosessointiaika oli pisin ja käyttöaste korkein. Kyseisessä järjestelmässä ei ollut välivarastoja eikä laitteita pystytty tehostamaan, joten lievityskeinoksi valittiin pullonkaulakoneiden lisääminen. Pullonkaulakoneiden optimaalisen määrän valitsemisessa hyödynnettiin ”mitä jos” -skenaarioita, jossa vertailtiin nykytilannetta siihen, että pullonkaulakoneita olisi ollut 2, 3, 4 tai 5. Loppuratkaisuna päädyttiin kolmeen pullonkaulakoneeseen, sillä tuotannon suorituskyky kasvoi hitaammin tämän pisteen jälkeen, jolloin koneiden lisääminen ei olisi perusteltua taloudelliselta kannalta. (Li et al. 2020)

3.3 Operatiivisen toiminnan analysoiminen

3.3.1 Reititusratkaisujen vertailu

Materiaalit virtaavat tuotantojärjestelmien läpi monilla erilaisilla keinoilla. Työntekijät voivat kuljettaa niitä käsissään tai erilaisilla materiaalinkäsittelyn apuvälineillä, kuten pumpukärryillä tai trukeilla. Materiaali voi myös liikkua automatisoiduilla kuljettimilla, joihin kuuluvat liukuhihnat ja erilaiset itsenäisesti toimivat robotit. Materiaalivirtojen optimointitehtävän kannalta on tärkeää, että materiaalien kulkemaa reittiä tai sen kuljettamisstrategiaa voidaan muuttaa.

Yang et al. (2020) hyödynsivät tehdassimulointia kolmen eri materiaalikuljetusstrategian vertailemiseen uudelleenkonfiguroitavassa sarjavalmistusjärjestelmässä. Tutkittava järjestelmä koostui varastohissistä, kolmestatoista kokoonpanopisteestä ja tuotteita näiden pisteiden välillä kuljettavista automatisoiduista kulkuneuvoista. Kokoonpanopisteet ovat liikutettavia, joten konfiguraatiota voidaan säätää tuotannon tarpeen mukaan. Tuotanto on jaettu näiden kokoonpanopisteiden osalta kahteen osaan, joista tutkimuksen optimointi keskittyy vain ensimmäisen kymmenen työpisteen sisältävään osuuteen. Optimointitehtävä keskittyy materiaaleja kokoonpanopisteiden välillä kuljettavien automaattitruckien reitityksen määrittämiseen. Ensimmäisessä reititysstrategiassa jokaiselle tuotteelle nimitetään oma AGV, joka kuljettaa tuotteen kaikkien työvaiheiden läpi, ja tuotteen valmistuttua aloittaa kierron alusta. Toisessa strategiassa kulkuneuvoille määrätään työpisteistä koostuva toiminta-alue, jonka koko määräytyy käytettävien AGV:en määrän perusteella. Tilanteessa, jossa käytettävissä olisi kaksi AGV:ta, jaettaisiin kymmenen toimintapisteen toiminta-alue kahteen viiden työpisteen kokonaisuuteen. Kyseinen strategia mahdollistaa useita eri variaatioita, jotka määräytyvät käytettävien AGV:en lukumäärän perusteella. Kolmannessa strategiassa työpisteet jaetaan edellä mainittuun kahteen viiden työpisteen toiminta-alueeseen. Alueen koko pysyy vakiona, mutta sen sisällä toimivien kulkuneuvojen määrää voidaan muuttaa. Simuloinnin avulla jokaiselle strategialle määritetään tuotannon suorituskyvyn kannalta optimaalinen automaattitruckien määrä sekä välivarastojen koko. Suurin kokonaistuotanto saavutetaan ensimmäisen strategian avulla. Kolmas strategia todetaan tasapainoiseksi ratkaisuksi, sillä sen avulla saadaan noin 80 % ensimmäisen strategian kokonaistuotannosta, tarvittavien kulkuneuvojen määrän ollessa puolet alempi. (Yang et al. 2020)

3.3.2 Eräkoon määrittäminen

Renteria-Marquez et al. (2020) hyödynsivät simulointia autoteollisuuden yrityksen eräkokojen analysoimiseen ja optimoimiseen. Simulointiin päädyttiin järjestelmän monimutkaisuuden vuoksi, sillä se sisälsi 96 työpistettä ja mallissa esiintyi 202:a erilaista raakaainetta. Tutkittavassa kokoonpanojärjestelmässä valmistettiin kahta erilaista automallia,

joiden kummankin valmistustavoitteeksi asetettiin 7200 yksikköä kuukaudessa järjestelmästä kerätyn historiadatan perusteella. Tarkoituksena oli löytää ratkaisu, joka saavuttaa valmistustavoitteen minimoiden samalla keskeneräisen tuotannon sekä tuotteiden keskimääräisen läpimenoajan. Valmistusprosessien kestossa esiintyvää vaihtuvuutta arviotiin kolmiojakauman avulla ja automallin vaihdosta syntyvää asetusajaksi asetettiin 20 minuuttia. Simulaation avulla testattiin skenaarioita, jossa eräkokko vaihteli 20–7200 yksikön välillä. Eräkoon ollessa 7200 yksikköä oli järjestelmä epästabiili, sillä keskeneräisen tuotannon maksimiarvo oli yli 1000 yksikköä ja keskimääräinen läpimenoaika olisi ollut ensimmäisellä automallilla noin viisi päivää, joka ei olisi todellisessa järjestelmässä mahdollista. Eräkokoa laskettaessa 20:een yksikköön ei valmistustavoitetta olisi puolestaan saavutettu. ”Mitä jos” -menetelmällä käytiin läpi erilaisia eräkoon vaihtoehtoja ja optimaaliseksi eräkooksi todettiin 90 yksikköä. Tällöin molemmilla automalleilla päästiin valmistustavoitteeseen ja keskimääräinen läpimenoaika laski ensimmäisellä automallilla 3.33 tuntiin. Simuloinnin todettiin olevan tehokas työkalu esittämään eräkokojen tasapainottamisen merkitystä sujuvan valmistamisen kannalta. (Renteria-Marquez et al. 2020)

3.3.3 Ohjausmenetelmien testaaminen

Tuotannosuunnittelu koostuu tuotannossa tarvittavien materiaali- ja kapasiteettimäärien määrittämisestä kysynnän sekä ennusteiden perusteella. Se on yksityiskohtainen suunnitelma siitä, miten tuotanto saadaan toteutettua mahdollisimman kustannustehokkaasti, tuotteiden kuitenkin valmistuessa asiakkaiden vaatimassa aikataulussa. Asiakkaan tilauksen laajuuden ja aikataulujen pohjalta määritetään tarvittava kapasiteetti, joka muodostuu muun muassa tuotannon työntekijöistä, työkoneista sekä tarvittavasta varastotilasta. Tuotannosuunnittelu sisältää myös tarvittavien materiaalien määrittämisen ja ohjauksen, jolla varmistetaan, että tuotannon jokaisessa vaiheessa on saatavilla riittävästi raaka-aineita ja työvälineitä töiden tekemiseen. (Logistiikan Maailma) Materiaalien tai työkalujen puute estää töiden tekemisen, mutta toisaalta varastot sitovat yrityksen pääomaa sekä varastointiin kuluu ylimääräistä työpanosta ja tilaa, jota voitaisiin käyttää tehokkaammin.

Materiaalinohjauksesta puhuttaessa japanilaisen tuotantoperiaatteen mukainen JIT-menetelmä (engl. Just In Time, JIT) esiintyy usein. Kyseinen ohjausmenetelmä on yksi Toyotan tuotantojärjestelmän tukipilareista ja sen mukaisesti tuotantoa tasoitetaan siten, että tuotteita ei valmisteta liian aikaisin tai myöhään, vaan juuri ajallaan. Menetelmän seuraaminen johtaa pienempiin varastoihin tuotannossa, joka lyhentää tuotteiden läpimenoaikoja ja soveltuu siten nopeasti muuttuvaan tuoteympäristöön. (Liker 2004)

Materiaalinohjaus voidaan jakaa kahteen eri muotoon: imu- ja työntöohjaukseen. JIT-menetelmää voidaan pitää imuohjausta hyödyntävänä ohjausmenetelmänä, sillä siinä valmistus käynnistyy todellisesta asiakaskysynnästä. Työntöohjauksessa valmistus pohjautuu kysynnän ennusteisiin, joten tuotteita valmistetaan varastoon riippumatta siitä, onko asiakastilausta olemassa. Työntöohjaus mahdollistaa tuotteille nopeammat toimitusajat, mutta tuotteiden varastoiminen aiheuttaa lisäkustannuksia, sitoo yrityksen pääomaa ja aiheuttaa epäkuranttiusriskin. (Lyonnet & Toscano 2014)

Yrityksen ei tarvitse käyttää ainoastaan yhtä ohjausmenetelmää, vaan ohjausmenetelmää voidaan muuttaa markkinatilanteen ja yrityksen strategian perusteella. Ohjausmenetelmä voidaan vaihdella myös tuotannon eri vaiheiden tai valmistettävien tuotevariaatioiden välillä, joten optimaalisen ratkaisun löytäminen on hyvin tapauskohtaista. (Lyonnet & Toscana 2014).

3.4 Simuloinnin erikoiskohteita

Edellisissä luvuissa toiminnan kustannustehokkuutta kehitettiin tehostamalla tuotantoa muun muassa materiaalivirtojen tai työkoneiden näkökulmasta. Seuraavissa alaluvuissa tutkitaan, miten kustannustehokkuutta voidaan parantaa laskemalla tuotannosta syntyviä kustannuksia energiankulutuksen näkökulmasta. Tämän lisäksi esitetään simuloinnin tuomia visuaalisia hyötyjä, joita on vaikeampi esittää numeerisesti.

3.4.1 Energiankulutuksen optimointi

Energiankulutuksen optimointi on vaihtoehtoinen tapa tehdä tuotannon toiminnasta kustannustehokkaampaa. Siinä kustannustehokkuus syntyy tuotannon energiakustannusten alentamisesta. Kohl et al. (2014) mukaan energiakulutuksen optimoimisessa käytetään kuormanhallintajärjestelmiä, joiden toiminta perustuu tuotannon energiankulutuksen säätelyyn sähkön muuttuvan pörssihinnan mukaan. Tällaiseksi säätelykeinoiksi esitettiin tuotannon kuorman vähentämistä päivittäisten kulutushuippujen aikaan, jolloin sähkön hinta on korkeimmillaan. Toiseksi keinoksi esitettiin energian varastointi, jolloin huippukuormien aikaan voidaan käyttää yöllä akkuihin varastoitua halvempaa sähköenergiaa. Yhtenä keinona esitettiin myös, tuotannon energiahuippujen alentamista, sillä korkeista energiapiikeistä voi syntyä lisäkustannuksia. Energiatohokkuuden parantaminen laitevaihdon avulla pidetään kuitenkin epäsoveltuvana ratkaisuna, siitä syntyvien suurten investointikustannusten takia. (Kohl et al. 2014)

Kohl et al. (2014) tutkivat simulointia hyväksi käyttäen erilaisten tuotevariaatioiden vaikutusta energiankulutukseen. He huomasivat, että valmistettavan tuotteen

ominaisuuksilla on vaikutusta energiankulutukseen, vaikka työvaihe tehtäisiin samalla tuotantolaitteella. Eroja energiankulutuksessa syntyy eroavasta työvaiheen kestosta, mutta hetkellinen energiankulutus vaihtelee myös eri tuotevariaatioiden välillä. Tuotteille ominainen energiaprofiili voidaan kerätä reaalijärjestelmästä, josta se voidaan siirtää simulaatiomalliin. Materiaalivirtojen simulaatiomallia pidetään soveltuvana lähtökohtana energiankulutuksen simuloimiseen, sillä se sisältää tarvittavan perusrakenteen, jonka toiminnallisuuteen voidaan lisätä tuotantolaitteiden energiaprofiilit eri tuotevariaatioille. (Kohl et al. 2014) Energiaprofiilien lisääminen simulaatiomalliin luo uusia mahdollisuuksia tuotannon optimoimiseen, sillä tavallisten suorituskykykymittareiden, kuten KET ja kokonaistuotanto, lisäksi voidaan huomioida tuotekohtaiset energiakustannukset optimaalista ratkaisua selvittäessä.

3.4.2 Tulosten visualisointi ja ymmärryksen luominen

Tehdassimulointi on visuaalinen työkalu, jota käyttämällä voidaan saada erilaisia näkökulmia muihin tuotannontutkimis- ja suunnittelumenetelmiin verrattuna. Balcin (1998) mukaan visuaalisuutta voidaan hyödyntää tulosten verifioimisessa. Mallissa esiintyviä logiikkavirheitä voi olla vaikea havaita matemaattisissa yhtälöissä, mutta simulaatiomallin animaatiota tutkittaessa virheet voivat olla helposti nähtävissä. Animaatioihin ei kuitenkaan kannata luottaa liikaa, sillä toimiva visuaalinen esitys ei yksin takaa tulosten oikeellisuutta. (Balci 1998)

Robinson (2014) toteaa simulaatiotutkimuksen auttavan kokonaisuuksien hahmottamisessa. Visuaalisuuden lisäksi, simulaatiotutkimuksen toteuttaminen vaatii syvällistä perehtymistä tutkittavaan järjestelmään, joten sen avulla voidaan huomata asioita, joita ei muuten olisi osattu ottaa huomioon. (Robinson 2014, s.10) Simulointi mahdollistaa erilaisten skenaarioiden kokeilemisen, joka laajentaa ymmärrystä järjestelmän mahdollisuuksista ja rajoitteista. Simuloinnilla voidaan arvioida miten tuotanto reagoisi laiterikkoihin tai kysynnänmuutoksiin, jolloin ollaan paremmin valmistautuneita, jos tällaisia tilanteita tapahtuisi käytännössä.

Simulaatioiden visuaalisuutta hyödynnetään myös yhteisymmärryksen luomisessa, koska sillä saadaan konkreettisia tuloksia verrattaessa yrityksen ja erehdyksen kautta saatuihin subjektiivisiin mielipiteisiin (Malega et al. 2020). Simulaatiotutkimuksessa osallisten henkilöiden eriävät mielipiteet voidaan testata ja verrata simulaatiomallissa, jolloin kyse ei ole enää pelkästään mielipideasiasta. Luvussa 2.3.4 tuotiin esille, että onnistuneen simulaatioprojektin kannalta tulokset tarvitsee lopulta implementoida käytäntöön. Robinson (2014) toteaaakin, että monet hyvät ideat ovat jätetty implementoimatta, koska

päätöksentekijöitä ei ole saatu vakuutettua niiden hyödyistä. Simulaatiomallin visuaalinen esitys voi olla muun aineiston ohella kriittinen tekijä, jolla esitetyn ratkaisun pätevyys saadaan tuotua esille. (Robinson 2014, s. 10)

4. PÄÄTELMÄT

Tässä luvussa vastataan kirjallisuustutkimuksen tulosten osalta työlle asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Tämän lisäksi pohditaan työn rajoituksia ja tuodaan esille mahdollisia jatkotutkimuksen aiheita. Ensimmäiseksi tutkimuskysymykseksi määritettiin: ”Mitä tehdassimuloinnilla tarkoitetaan?”. Simuloinnin käsite on hyvin laaja ja kontekstin mukaan sillä voidaan viitata lentäjien kouluttamisessa käytettäviin lentosimulaattoreihin tai palkin taipuman simuloimiseen. Työssä tarkasteltiin kuitenkin tehdassimulointia, jonka määriteltiin olevan tietokoneella tehtävää, tuotannon järjestelmien tapahtumapohjaista simuloimista. Tuotannon valmistusprosessit koostuvat useista peräkkäisistä vaiheista, joita kutsutaan tapahtumiksi, ja tehdassimuloinnin näkökulmasta järjestelmä pysyy muuttumattomana näiden tapahtumien välisenä aikana, joka mahdollistaa pitkien ajanjaksojen simuloimisen lyhyessä ajassa.

Toiseksi tutkimuskysymykseksi määritettiin: ”Miten tehdassimulointia hyödynnetään valmistavassa teollisuudessa?”. Kysymykseen vastattiin sekä simulointitutkimuksen toteuttamisen että yleisimpien käyttökohteiden näkökulmasta. Jokainen simulointitutkimus on uniikki toteutuksensa, jonka kesto voi vaihdella huomattavasti tutkimuksen laajuuden ja aikataulujen perusteella. Tutkimus koostuu kuitenkin tyypillisistä päävaiheista, joita tarkasteltiin työssä seuraavanlaisesti:

- Tutkimusongelman muodostaminen, jossa ongelman havaitsemisen ja siihen perehtymisen jälkeen asetetaan selkeät tavoitteet ohjaamaan toimintaa eteenpäin.
- Datan kerääminen, joka alkaa viimeistään tavoitteiden asettamisen jälkeen. Mallin rakentamiseen vaadittava data koostuu tuotantolaitteiden käsittely- ja huoltoajoista sekä materiaalivirtojen hallintasäännöistä, jota saadaan tyypillisesti tuotantojärjestelmän historiadatasta, laitetoimittajilta tai keskustelemalla järjestelmän tuntevien henkilöiden kanssa.
- Verifiointi ja validointi, jotka ovat menetelmiä, joilla varmistetaan, että simulointimalli käyttäytyy sille asetutun käyttötarkoituksen mukaisesti, riittävällä tarkkuudella
- Implementointi ja tutkimuksen päättäminen, jotka ovat tutkimuksen viimeinen vaihe. Tutkimuksen tavoitteiden täyttymisen ja saatujen tulosten vakuuttavuuden pohjalta päätöksentekijät implementoivat tai jättävät esitetyn ratkaisun implementoimatta. Onnistuneen simulointitutkimuksen perusvaatimuksena on simuloinnin hyödyntäminen varsinaisessa järjestelmässä.

Tutkimuksen päävaiheet käytiin läpi lineaarisesti, niiden tyyppillisessä toteuttamisjärjestyksessä. Simulointitutkimus on kuitenkin luonteeltaan iteratiivinen ja edellisiin vaiheisiin voidaan palata takaisin tarpeen ilmetessä.

Toiseen kysymykseen vastattiin myös käyttökohteiden osalta työn kolmannessa luvussa, jossa esiteltiin valmistavan teollisuuden osa-alueita, joissa voidaan hyödyntää simulointia. Tarkastelua tehtiin sekä tuotannonohjauksen että tuotantojärjestelmien suunnittelun näkökulmasta. Käyttökohteita simuloinnille löytyi muun muassa resurssitarpeiden arvioimisessa, tuotannon tehokkuuden analysoimisessa ja kehittämisessä, sekä energiakustannusten optimoimisessa.

Työssä tarkastelluista tapaustutkimuksissa simuloinnin käyttämisessä tuodaan esille tiettyjä simuloinnin vahvuutena pidettäviä ominaisuuksia. Simulointi mahdollistaa erilaisten ratkaisujen vertailemisen nopeasti, ilman varsinaiseen järjestelmään tehtäviä muutoksia. Sen avulla voidaan suorittaa ”entä jos” -analyysyjä, jossa järjestelmän käyttäytymistä voidaan arvioida erilaisissa tilanteissa. Tätä pidetään erityisen tärkeänä nykypäivän valmistavassa teollisuudessa, jonka tarvitsee pystyä mukautumaan nopeasti asiakkaiden muuttuviin tarpeisiin. Vahvuutena toistuu myös simulaation tarjoama visuaalisuus, jolla se erottuu muista mallinnuskeinoista.

Tutkimuksessa tuodaan vain suuntaa antavasti esille valmistavan teollisuuden tyyppisimmät sovelluskohteet, sillä aiheen laajuuden vuoksi kaikkia käyttökohteita ei kyetty esittämään. Sovelluskohteita simuloinnilla on myös työssä tarkastellun diskreetin tapahtumapohjaisen simuloinnin ulkopuolella. Jatkotutkimuskohteina voitaisiinkin keskittyä esimerkiksi agenttipohjaisen simuloinnin sovelluskohteisiin tai digitaalisen kaksosen konseptiin.

Kolmanneksi kysymykseksi asetettiin: ”Mitä haasteita simuloinnin käyttämiseen liittyy?”. Haasteena simuloinnin käyttöön liittyen voidaan pitää sen kokeellista luonnetta. Sillä voidaan testata monia erilaisia ratkaisuja, mutta tämä ei itsessään takaa optimaalisen ratkaisun löytämistä. Kuten tapaustutkimuksista havaittiin, niin optimaalisen ratkaisun saavuttaminen vaatii usein erilaisten algoritmien hyödyntämistä. Aiheen jatkotutkimuksissa voitaisiinkin syventyä esimerkiksi geneettisten algoritmien hyödyntämiseen optimaalisen ratkaisun etsimisessä. Haasteita esiintyy myös simulaatiomallin kehittämiseen liittyen. Mallin luotettavuus rakentuu kerätyn datan pohjalta ja sitä ei ole aina saatavilla. Erityisesti ongelmia aiheutuu työssä määritetystä C-luokan datasta, jota ei ole saatavilla, eikä sitä pystytä keräämään järjestelmästä. Tällöin kyseinen alue tarvitsee jättää simuloinnissa huomioimatta tai luottaa asiantuntijoiden antamiin arvioihin. Molemmissa ratkaisuissa mallin epäluotettavuus kuitenkin kasvaa.

5. YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia tehdassimuloinnin sovelluskohteita valmistavassa teollisuudessa. Millaisia hyötyjä simuloinnilla näissä sovelluskohteissa saavutetaan ja millaisia haasteita sen käyttämiseen liittyy. Tätä varten työssä käytiin läpi tyypillisen simulointitutkimuksen rakenne sisältämät vaiheet ja tehdassimulointi käsitteen ymmärtämiseksi tutustuttiin simuloinnin määritelmään. Työn tavoitteen saavuttamiseksi asetettiin kolme tutkimuskysymystä. Aiheen tarkastelu toteutettiin pääasiassa kirjallisuuskatsauksena, mutta simuloinnin käyttökohteiden esittämisen tukena hyödynnettiin myös tapaustutkimuksia.

Kandidaatintyön toisessa luvussa työssä käsiteltiin erilaisia simulointimallien luokittelutapoja tehdassimuloinnin määritelmän ymmärtämiseksi. Luokittelua tehtiin mallin aikataustarkastelun perusteella staattisiin ja dynaamisiin simulaatiomalleihin, ja simulaation ulostulon satunnaisuuden perusteella stokastisiin ja deterministisiin simulaatiomalleihin. Tehdassimuloinnin määritettiin olevan dynaamista tapahtumapohjaista simulointia, sillä siinä valmistusjärjestelmän toiminta esitetään diskreetteinä tapahtumina, joiden välillä malli pysyy muuttumattomana. Toisessa luvussa käytiin myös simulaatiotutkimuksen kannalta keskeisiä vaiheita, joihin kuului: tutkimusongelman muodostaminen, datan kerääminen, verifiointi ja validointi sekä implementointi ja tutkimuksen päättäminen.

Kolmannessa luvussa käytiin lävitse simuloinnin sovelluskohteita valmistavassa teollisuudessa hyödyntäen teoriaa ja tapaustutkimuksia. Luvun alussa määriteltiin joustavan valmistusjärjestelmän käsite, sillä valtaosa tarkastelluista sovelluskohteista toteutettiin tällaisissa järjestelmissä. Tapaustutkimusten osalta tuotiin esille niiden tavoitteet, tulokset sekä minkälaisia hyötyjä simuloinnilla saavutettiin. Tapaustutkimuksissa esitellyt osat alueet sisälsivät operatiivisen toiminnan analysoimisen osalta reititysratkaisujen vertailamisen ja eräkokojen määrittämisen. Tämän lisäksi tuotiin esille, miten simuloinnilla voidaan optimoida energiankulutusta tai valmistusmenetelmien tehokkuutta.

Tehdassimuloinnilla todettiin olevan useita sovelluskohteita valmistavassa teollisuudessa. Sitä hyödyntämällä yritykset voivat suorittaa testejä järjestelmän digitaaliselle mallille, jolloin varsinaista tuotannon toimintaa ei häiritä. Sillä voidaan etsiä tuotannon pullonkaloja ja hakea ongelmille optimaalista ratkaisua, jonka avulla yritykset voivat parantaa toimintansa kustannustehokkuutta ja saavuttaa kilpailuetua muihin yrityksiin nähden.

LÄHTEET

- Alan, A. & Pritsker, B. (1998). Principles of Simulation Modeling. In Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice. John Wiley & Sons. pp. 31–51. Saatavissa rajoitetusti: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003Z42F2/handbook-simulation-principles/handbook-s-principles>
- Balci, O. (1990). Guidelines for successful simulation studies. *Winter Simulation Conference, 1990*. IEEE. pp. 25–32. <https://doi.org/10.1109/WSC.1990.129482>
- Balci, O. (1998). Verification, Validation, and Testing. In Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice. John Wiley & Sons. pp. 335–393. Saatavissa rajoitetusti: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003Z44D1/handbook-simulation-principles/handbook-s-verification>
- Banks, J. (1998). Principles of Simulation. In Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice. John Wiley & Sons. pp. 3–30. Saatavissa rajoitetusti: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003Z4236/handbook-simulation-principles/definition-simulation>
- Banks, J. (2003). Discrete event simulation. Encyclopedia of Information systems. pp. 663–671. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227240-4/00045-9>
- Carson, J. S. (2005). Introduction to modeling and simulation. *Proceedings - Winter Simulation Conference, 2005*, pp. 16–23. <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574235>
- Cochran, J. K., Mackulak, G. T. & Savory, P. A. (1995). Simulation Project Characteristics in Industrial Settings. *Interfaces (Providence)*, 25(4), pp. 104–113. <https://doi.org/10.1287/inte.25.4.104>
- Kikolski, M. (2016). Identification of production bottlenecks with the use of Plant Simulation software. *Engineering Management in Production and Services*, 8(4), pp. 103–112. <https://doi.org/10.1515/emj-2016-0038>
- Kohl, J. Spreng, S. Franke, J. (2014). Discrete Event Simulation of Individual Energy Consumption for Product-varieties. *Procedia CIRP*. pp. 517–522. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.088>
- Lapinleimu, I. (2001) *Ideaalitehdas: tehtaan suunnittelun teorian kiteytys*. 2. hiukan korj. p. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Lapinleimu, I., Kauppinen, V. and Torvinen, S. (1997). Kone- ja metallituoteteollisuuden tuotantojärjestelmät. WSOY, Porvoo. 398 s.

Li, G. Z., Xu, Z. G., Yang, S. L., Wang, H. Y., Bai, X. L. & Ren, Z. H. (2020). Bottleneck identification and alleviation in a blocked serial production line with discrete event simulation: A case study. *Advances in Production Engineering & Management*, 15(2), pp. 125–136. <https://doi.org/10.14743/apem2020.2.353>

Liker, J. K. (2004). The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer. McGraw-Hill. pp. 24.

Logistiikan Maailma. Tuotannosuunnittelu ja ohjaus. [verkkosivu]. Viitattu 10.11.2022. Saatavissa: <https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/tuotannosuunnittelu-ja-ohjaus/>

Lyonnet, B. & Toscano, R. (2014) Towards an adapted lean system - a push-pull manufacturing strategy. *Production planning & control*. [Online] 25(4). pp. 346–354. <https://doi.org/10.1080/09537287.2012.702867>

Malega, P. Gazda, V. Rudy, V. (2022). Optimization of production system in plant simulation. *Simulation*. 98(4). pp. 295–306. <https://doi.org/10.1177/00375497211038908>

Malega, P., Gazda, J., Kobulnicky, J. (2017). Improvement of production efficiency of tapered roller bearing by using plant simulation. *International Journal of Simulation Modelling*. 4. pp. 682–693. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM16\(4\)10.405](https://doi.org/10.2507/IJSIMM16(4)10.405)

McGuire, F. (1998). Simulation in Healthcare. In *Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. John Wiley & Sons. pp. 605–627. Saatavissa rajoitetusti: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003Z4651/handbook-simulation-principles/simulation-healthcare>

McGinnis, L. F. & Rose, O. (2017). History and perspective of simulation in manufacturing [Proceeding]. *2017 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 385–397. <https://doi.org/10.1109/WSC.2017.8247801>

Musselman, K. (1998). Guidelines for Success. In *Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. John Wiley & Sons. pp. 721–743. Saatavissa rajoitetusti: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003Z47E5/handbook-simulation-principles/guidelines-success>

Norman, V. & Banks, J. (1998). Managing the Simulation Project. In *Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. John Wiley & Sons. pp. 745–764. Saatavissa rajoitetusti: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003Z47L1/handbook-simulation-principles/managing-simulation-project>

- Renna, P. & Ambrico, M. (2015) Design and reconfiguration models for dynamic cellular manufacturing to handle market changes, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 28(2). pp. 170–186. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2013.874590>
- Renteria-Marquez, I. A., Almeraz, C. N., Tseng, T. -L. B. & Renteria, A. (2020). A Heijunka Study for Automotive Assembly Using Discrete-Event Simulation: A Case Study. 2020 Winter Simulation Conference (WSC). pp. 1641–1651. <https://doi.org/10.1109/WSC48552.2020.9383927>
- Rifai, A. P., Dawal, S. Z. M., Zuhdi, A., Aoyama, H. & Case, K. (2016). Reentrant FMS scheduling in loop layout with consideration of multi loading-unloading stations and shortcuts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 82(9–12). pp. 1527–1545. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7395-5>
- Robinson, S. (1999). Simulation Verification, Validation and Confidence: A Tutorial Can we learn from wrong models? A study exploring the usefulness and characteristics of wrong models in Operational Research View project Linking simulation and AI View project. *Transactions of the Society for Computer Simulation International*. 16. pp. 63–69. Saatavissa: <https://www.researchgate.net/publication/234800615>
- Robinson, S. (2014). *Simulation: The Practice of Model Development and Use*, 2nd edition. John Wiley & Sons. pp. 316. ISBN: 978-1137328021
- Rohrer, M, W. (1998). Simulation of Manufacturing and Material Handling Systems. In *Handbook of Simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice*. John Wiley & Sons. pp. 519–545. Saatavissa rajoitetusti: <https://app.knovel.com/hot-link/pdf/id:kt003Z45C1/handbook-simulation-principles/simulation-manufacturing>
- White, K. P. & Ingalls, R. G. (2020). The Basics of Simulation [Proceeding]. *2020 Winter Simulation Conference (WSC)*, pp. 1087–1101. <https://doi.org/10.1109/WSC48552.2020.9384079>
- Yang, S.L., Xu, Z.G., Li, G.Z. & Wang, J.Y. (2020). Assembly transport optimization for a reconfigurable flow shop based on a discrete event simulation, *Advances in Production Engineering & Management*, Vol. 15, No. 1, pp. 69–80. <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.350>