

Juho Ranta

SIMULOINTI JA SIMULOINTIMALLIN TOTEUTUS TUOTANNOSSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Juho Ranta: Simulointi ja simulointimallin toteutus tuotannossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Kone- ja tuotantotekniikka
Huhtikuu 2023

Simulointia pidetään usein itsestään selvänä työkaluna, jolle syötetään muuttujia ja saadaan tuloksia. Todellisuudessa simulointimallin määrittelemisen, rakentamisen ja tulosten analysointi edellyttää asianmukaisia työkaluja, menetelmiä ja ajatusmalleja.

Simulointi pyrkii jäljittelemään tosielämän systeemejä mahdollisimman tarkasti aikaan suhteutettuna. Ensimmäisenä haasteena vastaan tulee tosielämän kompleksisuus, jota pyritään yksinkertaistamaan matemaattisilla ja loogisilla menettelytavoilla. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan kyseisiä matemaattisia ja loogisia menettelytapoja, sekä esitellään simuloinnin, eli systeemin mallintamisen käsitettä ja menetelmien luokittelutapoja tieteen ja teollisuuden alalla. Työssä syvennytään tuotannossa tapahtuvaan simulointiin tutkimusesimerkkien avulla ja esitellään simulointiprojektin toteutus tuotannolle vaihe vaiheelta.

Onnistunut simulointiprojekti edellyttää simuloitavan kohteen syvällistä ymmärrystä, jotta simulointimalli voidaan rakentaa oikeanlaisilla oletuksilla. Tämän opinnäytetyön kohdalla tuotanto oli kohde ja siitä syystä tuotannon peruseräperäisiin syvennytään tarkemmin.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella osoitetaan tuotannon simuloinnin keskeisten menetelmien jakautuvan diskreettiin ja jatkuvaan aikamaailmaan, joissa käytetyimmät diskreetit simulointimenetelmät ovat tapahtumapohjainen simulointi (engl. discrete event simulation, DES) ja agenttipohjainen simulointi (engl. agent based simulation, ABS). Jatkuviin, eli dynaamisiin simulointikohteisiin sovelletaan pääsääntöisesti systeemidynaamisia menetelmiä (engl. system dynamics, SD).

Työn tuloksena voidaan havaita simuloinnin tuoma kilpailuetu, monipuolinen hyödyntämismahdollisuus teollisuudessa ja tuotannon aloilla, sekä simuloinnin jatkuva kehitys, joka seuraa vahvasti laskentatehon ja matematiikan tutkimuksen kehitystä.

Avainsanat: Simulointi, systeemin mallintaminen, tuotannon simulointi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SIMULOINTI	3
2.1 Systeemi ja sen mallintaminen	4
2.1.1 Systeemin mallin luokittelu	6
2.1.2 Menetelmien luokittelu	7
2.2 Simulointi tuotannossa	9
2.2.1 Tuotanto	10
2.2.2 Tuotannontekijät	10
2.2.3 Tuotannon periaatteet	10
2.2.4 Tuotannon mittarit	11
2.3 Esimerkkejä	12
2.3.1 Kapasiteettisuunnittelu ja prosessianalyysi pienpanimossa	12
2.3.2 Henkilöstökapasiteetin tarpeen analysointi huoltoyksikössä	13
2.3.3 PC-kameran kokoonpanolinjan tasapainottaminen	14
3. SIMULOINNIN TOTEUTUS TUOTANNOLLE	15
3.1 Tavoitteiden ja ongelmien määrittely	15
3.2 Tiedon keruu ja analysointi	16
3.3 Mallintaminen	18
3.4 Validointi	18
3.5 Simulaatioiden suorittaminen	19
3.6 Tulosten analysointi ja tulkinta	20
3.7 Dokumentointi	20
4. TUOTANNON SIMULOINNIN TULEVAISUUS	21
5. YHTEENVETO	23
LÄHTEET	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABS	Agent-based simulation, agenttipohjainen simulointi
AR	Augmented reality, lisätty todellisuus
CAD	Computer aided design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	Computer aided manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
DES	Discrete event simulation, tapahtumapohjainen simulointi
DMU	Digital mock up, digitaalinen mock-up
DS	Dynamic systems, dynaamiset systeemit
DT	Digital twin, digitaalinen kaksonen
ERP	Enterprise resource planning, toiminnanohjausjärjestelmä
IoT	Internet of Things, esineiden internet
LCA	Life cycle assessment, elinkaariarviointi
MES	Manufacturing execution system, tuotannonohjausjärjestelmä
MTO	Make-to-order, tilausohjautuva
MTS	Make-to-stock, varasto-ohjautuva
NIST	National Institute of Standards and Technology, Yhdysvaltain standardointi- ja teknologiainstituutti
PDM	Product data management, tuotetiedonhallinta
SD	System dynamics, systeemidynamiikka
SCADA	Supervisory control and data acquisition, Ohjaus- ja valvontajärjestelmä
TPT	Throughput time, läpimenoaika
VF	Virtual factory, virtuaalitehdas
VR	Virtual reality, virtuaalitodellisuus

1. JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä esitellään simuloinnin teoriaa ja menetelmiä sekä perehdytään simulointimallin hyödyntämiseen ja toteutukseen tuotannon näkökulmasta. Kokonaisvaltaisen simulointiprojektin toteutus tuotannolle vaatii tuotantokohtaista, syvällistä ymmärtämistä kutakin tuotetta koskevasta prosessista ja koko arvoketjusta. Toisaalta rajattuna ja kohdennettuna simulointi voidaan toteuttaa pienemmällekin kokonaisuudelle, kuten yksittäiselle tuotantolinjalle.

Motivaationa työn kirjoittamiselle on ollut simuloinnin monipuolinen hyödyntämismahdollisuus teollisuuden alalla ja erityisesti konetekniikassa. Aihe on erittäin mielenkiintoinen sille luontaisen jatkuvan kehittämisen ja oppimisen näkökulmasta, mikä on insinööritieteitä opiskelevan henkilön ajatusmallin kanssa hyvin yhteensopivaa.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia käytössä olevia simuloinnin menetelmiä, ajatusmalleja ja tapoja tuotannon kannalta kirjallisuuskatsauksen keinoin. Tässä työssä esitellään esimerkkejä, joissa simulointia on onnistuneesti hyödynnetty yrityksen liiketoiminnan edistämiseksi. Yksittäisten simulointityökalujen ja jokaisen matemaattisen menetelmän teorian tarkempi esittäminen kuitenkin ylittää tämän opinnäytetyön laajuuden.

Keskeisiä kysymyksiä, joihin tämän opinnäytetyön on tarkoitus antaa vastauksia, ovat seuraavat:

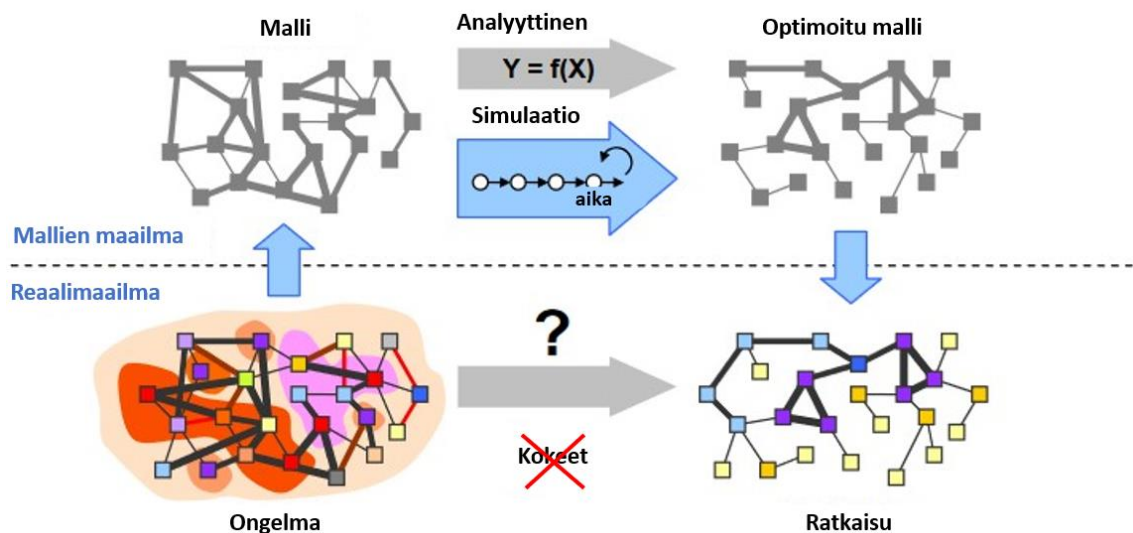
1. Mitä simuloinnilla saavutetaan?
2. Mihin simulointimallin rakentaminen perustuu ja mihin se on kykeneväinen?
3. Mitä tuotannon osa-alueita voidaan simuloida?
4. Kuinka simulointiprojekti toteutetaan?

Tarvittava teoria ja vastauksia kysymyksiin on etsitty lähdemateriaaleista niiden tietoja yhdistelemällä ja vertailemalla. Työssä käytetty aineisto ja tieto on etsitty laajasti eri tietokannoista, joista suurimmat ovat Andor, Emerald Publishing, Google Scholar, Knovel, ScienceDirect, Springer ja ProGuest. Myös eri instituuttien internetsivuja sekä Tampereen yliopiston kirjaston ja oman kirjallisuuskokoelman lähteitä on hyödynnetty. Käytetty aineisto on ollut vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleja, konferenssijulkaisuja, instituuttien internetsivuja ja aiheeseen liittyvää kirjallisuutta.

Työn rakenne koostuu johdannon lisäksi simuloinnin määrittelystä ja teoriasta sekä sen linkittymisestä tuotantoon. Toisen luvun lopussa siirrytään tuotannon simulointiesimerkkien kautta simuloinnin toteutuksen yksityiskohtiin tuotannon näkökulmasta. Lopussa käsitellään simuloinnin tulevaisuutta ja yhteenvedossa kootaan käsitellyt asiat yhteen vastaten tämän opinnäytetyön keskeisiin kysymyksiin.

2. SIMULOINTI

Simuloinnilla tarkoitetaan tosielämän prosessin tai systeemin jäljitelmää, joka on suhteutettu aikaan. Simulointi voidaan tehdä käsin tai tietokoneella, ja siihen liittyy keinotekoisien historian luominen, jonka perusteella voidaan tehdä johtopäätöksiä tosielämän systeemin erityispiirteistä (Banks et al. 2010, s. 21). Systeemin jäljitelmän luominen ja sen tieteellinen tarkastelu usein edellyttävät matemaattisia tai loogisia oletuksia. Näin saadaan malli, jota voidaan hyödyntää sitä vastaavan todellisen systeemin käyttäytymisen ymmärtämiseksi (Law & Kelton 1991, s. 1).



Kuva 1. Mallinnuksen maailma, muokattu lähteestä (Borshev & Filippov 2004).

Analyttisen tarkastelun tekemiseksi jokin malli voidaan tehdä yksinkertaisimmillaan matemaattisten menetelmien, kuten algebran, laskennan tai todennäköisyysteorioiden avulla. Näin voidaan saada täsmällistä tietoa asetettuihin kysymyksiin. Todellisuudessa reaalimaailman systeemit ovat kuitenkin niin kompleksisia, että niistä tehtyjen mallien analyttinen tarkastelu vaatii avukseen simulointia. Kuva 1 havainnollistaa reaalimaailman ja mallien maailman välistä suhdetta sekä edellä mainittuja tarkastelutapoja, joilla pyritään etsimään reaalimaailmassa hyödynnettäviä ratkaisuja. Simuloinnin avulla voidaan tarkastella mallia numeerisesti ja kerätyn datan avulla voidaan estimoida mallin todellisia ominaisuuksia. (Law & Kelton 1991, s. 1)

Ensisijaisiksi simuloinnin eduiksi Schmidt ja Taylor (1970, s. 5) listaavat seuraavat:

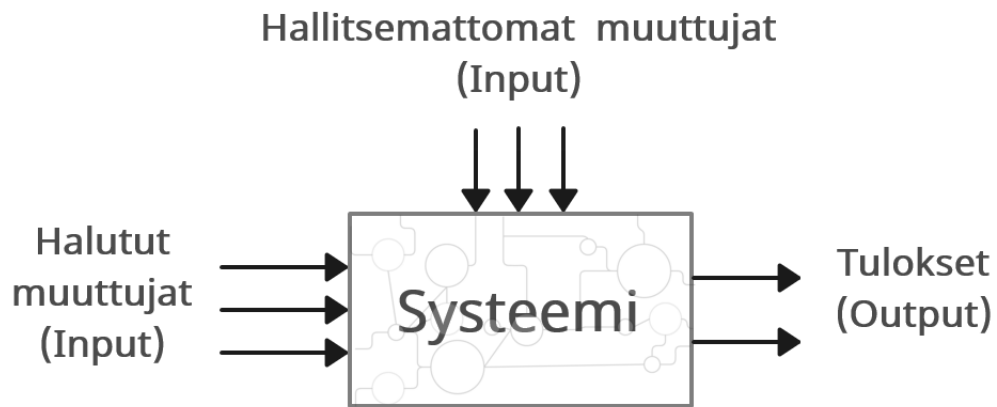
- Järjestelmän simulointimallia voidaan hyödyntää niin useasti kuin halutaan erilaisten tilanteiden analysoimiseen sen rakentamisen jälkeen.
- Simulointimenetelmät ovat käteviä suunniteltujen järjestelmien analysointiin, ja niistä saatavilla oleva informaatio on parhaimmillaankin epämääräistä.
- Jatkoanalyysija varten tarvittava data saadaan yleensä simulointimallin avulla edullisemmin kuin todellisesta systeemistä.
- Simulointimenetelmät ovat usein helpommin sovellettavissa komplekseihin systeemeihin kuin pelkät analyysimenetelmät ja täten useamman yksilön hyödynnettävissä.

Simulointimenetelmien kehityksen vuoksi niitä on sovellettu monilla eri aloilla, kuten valmistuksessa, palveluissa, puolustuksessa, terveydenhuollossa ja julkisissa palveluissa. Simulointimenetelmät ovat erityisen laajassa käytössä operatiivisen hallinnan alalla. Tietokoneiden kehitys ja laskentakapasiteetin lisääntyminen on mullistanut simulointialan. Tietotekniikan kehitys on ylipäätään vahvasti tukenut käytännön simulointityökalujen ja tekniikoiden käyttöönottoa. (Jahangirian et al. 2010)

2.1 Systemi ja sen mallintaminen

Systemillä tarkoitetaan asioiden joukkoa, jotka toimivat yhdessä mekanismin osina tai verkostoon liitettävänä elementteinä ja muodostavat yhdessä monimutkaisen kokonaisuuden (Oxford Languages 2023). Mikä tahansa asia voi siis olla osa systeemiä, kunhan sillä on rakenne ja funktio (Kawaguchi 2003, s. 25–26). Visualisoitu tai mallinnettu systemi esitetään yleensä komponenttiblokkeina (kuva 2), ja ne vaihtavat ainetta, energiaa tai tietoa ympäristönsä kanssa (Pidwirny 2006).

Yleisesti systemit jaotellaan avoimiin ja suljettuihin systeemeihin. Avoin systemi on jatkuvasti vuorovaikutuksessa ympäristön kanssa. Se vastaanottaa syötteitä (engl. input) ja tuottaa ulospäin tuotoksia (engl. output). Suljetut systemit puolestaan on eristetty ympäristöstä. Käytännössä täysin suljetut systemit, kuten kontrolloidut laboratorioko-keet, ovat todellisuudessa harvinaisia. (MBA Knowledge Base 2023)



Kuva 2. Avoimen systeemin olennaiset perusosat, muokattu lähteestä (Schmidt & Taylor 1970, s. 7).

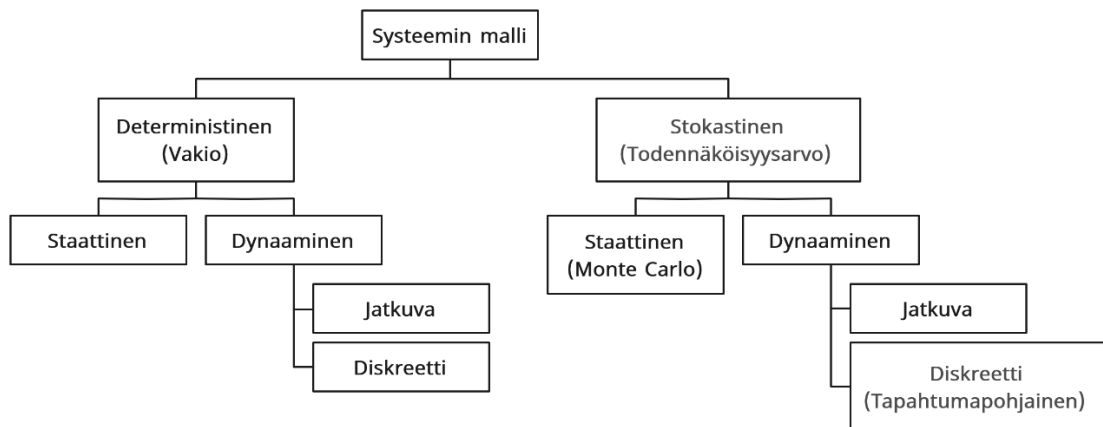
Kuva 2 havainnollistaa, kuinka systeemin syötteitä on todellisuudessa haluttuja ja hallitsemattomia. Hyvin toteutettu malli yksinkertaistaa matematiikan ja logiikan sallimilla keinoilla hallitsemattomat muuttujat, jotta systeemin mallista saadaan käytössä olevien resurssien puitteissa mahdollisimman vähän väärässä oleva, hyödyllinen malli (Schmidt & Taylor 1970, s. 7; Gleick 2008, s. 15). Toisin sanoen, aikaansaatu malli on aina väärässä. Sokolowski et al. (2012, s. 14) luettelevatkin neljä ominaisuutta, joista mallintajan tulee olla huolissaan:

- **Fideliteetti** kuvaa, kuinka lähellä malli tai simulointi on todellisuutta. Korkea fideliteetti kertoo mallin tai simuloinnin käyttäytyvän samalla tavalla kuin todellinen systeemi. Mallien kehittämisessä tulee keskittyä vain tutkittaviin systeemin näkökohtiin. Alhainen fideliteetti on hyväksyttävää vähemmän merkityksellisten näkökohtien kanssa.
- **Validiteetti** kuvaa mallin tarkkuuden kolmea rakennetta: 1) Todellisuutta – kuinka tarkasti malli vastaa todellisuutta; 2) edustavuutta – jotkut näkökohdat on edustettu, jotkut eivät; 3) vaatimuksia – erilaisia fideliteetin tasoja tarvitaan eri sovelluksissa.
- **Resoluutio** on yksityiskohtien taso, jolla todellisuus on simuloitu. Luonnollisesti tarkempi kuvaus tuottaa suuremman resoluution. Simulaatiot voivat olla matalasta korkeaan resoluutioon.
- **Skaala** on skenaarion tai tapahtuman koko, jonka simulointi sisältää. Mitä suurempi systeemi on, sitä suurempi skaala simuloinnilla on.

2.1.1 Systeemin mallin luokittelu

Systeemin mallit ovat pääsääntöisesti luokiteltavissa matematiikan avulla joko deterministisiksi (input- ja outputmuuttujat ovat vakioarvoja) tai stokastisiksi (ainakin yksi input- tai outputmuuttuja on todennäköisyys). Lisäksi malli on joko staattinen (aikaa ei oteta huomioon) tai dynaaminen (ajasta riippuvat vuorovaikutukset muuttujien kesken huomioidaan). (Maria 1997)

Tyypillisesti reaali maailmasta tehtävät simulaatiomallit sisältävät todennäköisyyksiä ja niissä huomioidaan muuttujien keskeiset vuorovaikutukset ajan suhteen, eli ne ovat stokastisia ja dynaamisia. Kun tähän lisätään Lawn ja Keltonin (1991) dynaamisen mallin kahden tyyppin luokittelu diskreeteistä ja jatkuvista malleista, saadaan systeemin mallille seuraavan kuvan numero 3 mukainen taksonomia. (Shishvan & Benndorf 2017)



Kuva 3. Mallien matemaattinen luokittelu eri tyypeihin, muokattu lähteestä (Shishvan & Benndorf 2017).

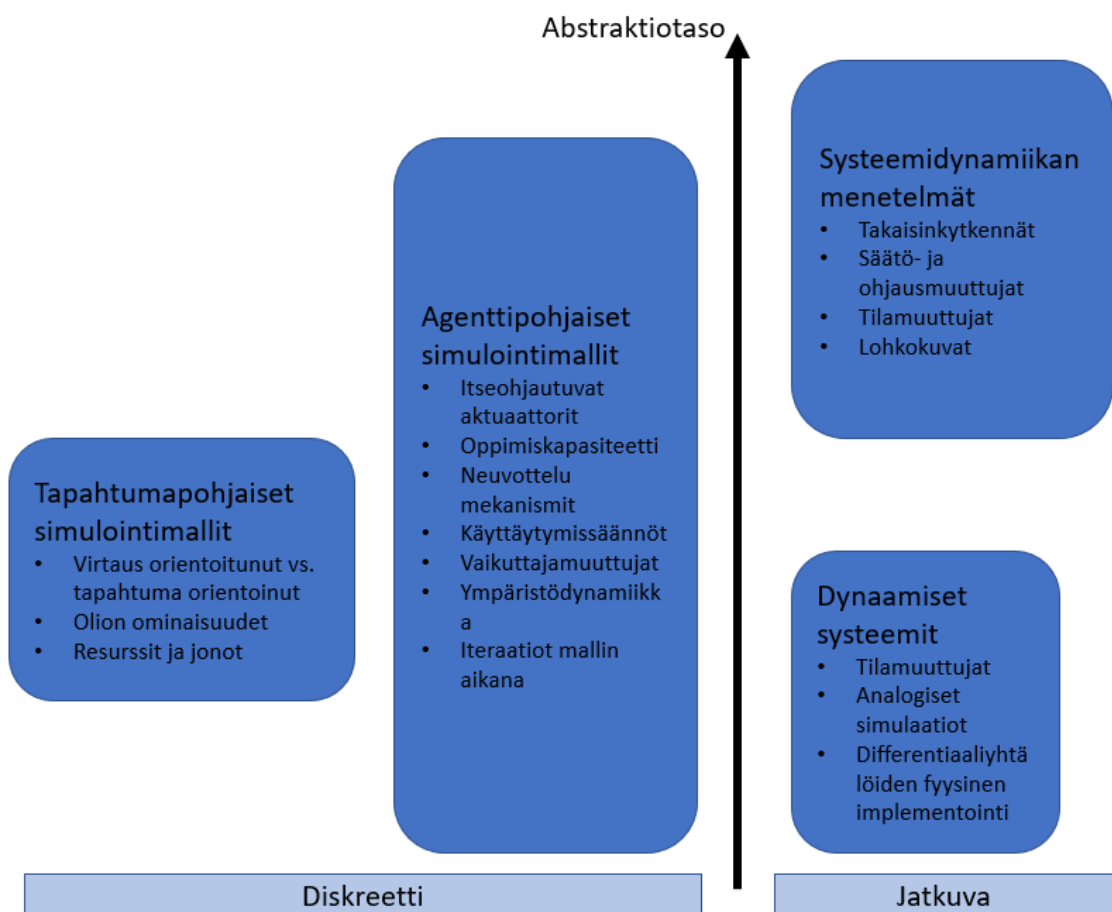
Lisäksi on huomioitava, että erityisesti fysikaalisten ilmiöiden simuloinnin kannalta Mourzis et al. (2014) jakaa simulaatiomallin tietorakenteen verkostopohjaiseksi (esim. mallinnus $n \times n$ ruudukon keskiarvolla) tai partikkelipohjaiseksi (esim. n -kappale simuloinnit, joissa tieto on eriteltyä jokaiselle simuloitavalle partikkelille). Luonnollisesti partikkelipohjainen simuloinnin haittana on sen vaatima raskas laskentateho. (Ronne 2012)

Tämä on merkityksellistä mainita, koska kompleksista tuotannon dynaamista käyttäytymistä on verrattu virtausmekaniikkaan (Efthymiou et al. 2009). Aihe tarvitsee kuitenkin lisää tutkimusta ja on virtausmekaniikan myötä erittäin laaja, sillä se on myös yksi miljoonan dollarin Millenium-ongelmista Navier–Stokes-yhtälön (yhtälöiden joukko, joka kuvaa fluidien liikettä) myötä. (Gleick 2008; Clay Mathematics Institute 2023) Aiheen tar-

kempi esittely ylittäisi tämän opinnäytetyön laajuuden. Tämä kuitenkin mahdollistaisi monien osittaisdifferentiaaliyhtälöihin sovellettavien ratkaisumenetelmien hyödyntämisen myös tuotannon dynaamisille prosesseille.

2.1.2 Menetelmien luokittelu

Jahangirian et al. (2010) tutkimuksen mukaan tuotannon ja liiketoiminnan eniten sovelletuin menetelmä vuonna 2010 on ollut tapahtumapohjainen simulointi (engl. discrete event simulation, DES). Sitä seuraavat systeemidynamiikan menetelmät (engl. system dynamics, SD), hybridimenetelmät ja agenttipohjainen simulointi (engl. agent-based simulation, ABS).



Kuva 4. Menetelmien luokittelu aika-abstraktio tasolla, muokattu lähteestä (Piera et al. 2018).

Menetelmistä (kuva 4) historiallisesti perinteisiä ovat tapahtumapohjaiset simulointimallit ja systeemidynamiikan menetelmät. Agenttipohjaiset menetelmät ovat tuotannon simuloinnissa tuoreempia suhteutettuna edellä mainittuihin menetelmiin, mutta ovat nosta- neet suosiotaan lähiaikoina ohjelmointikielien ja valmiiden työkalujen kehityksen myötä.

Dynaamiset systeemit puolestaan liittyvät suurilta osin fyysisten systeemien mallinnukseen. (Borshchev & Filippov 2004)

Tapahtumapohjaiset simulointimallit perustuvat olioiden, resurssien ja lohkokarttojen käsitteisiin, jotka kuvaavat olioiden kulkua ja resurssien jakamista. Tämä lähestymistapa juontaa juurensa 1960-luvun Geoffrey Gordonin (1978) kehittämästä yleispätevästä simulaatio systeemistä (engl. general purpose simulation system, GPSS). Oliot ovat passiivisia objekteja, jotka edustavat ihmisiä, osia, asiakirjoja, tehtäviä, viestejä jne. Ne liikkuvat virtakaavion lohkojen läpi, joissa ne hidastelevat välivarastoiksi, ovat jonossa ja käsittelyssä. Ne varaavat ja vapauttavat resursseja, jakautuvat, yhdistyvät jne. Tälle mallinnustyyliille on saatavissa satoja kaupallisia työkaluja, joiden käyttöliittymät voivat olla tapauskohtaisesti hyvinkin erilaisia, mutta niiden alla on samanlaisia diskreetin tapahtuman simulointimootoreita. (Borshchev & Filippov 2004)

Systemidynaamisen (SD) menetelmän lähestymistapa soveltuu kaikille dynaamisille systeemeille, jotka ovat luonteeltaan lineaarisesti tai epälineaaraisesti riippuvaisia ja takaisinkytkentää (engl. feedback loop) hyödyntäviä. SD mallit rakennetaan tietyn ongelman ympärille, joka määrittää malliin sisällytettävät muuttujat. Menetelmän keskeisin piirre on takaisinkytkentäperiaate, joka on erittäin hyödyllinen tietosilmukoiden mallintamiseen teknisissä järjestelmissä. (Sokolowski et al. 2012, s. 227–228; Piera et al. 2018)

Dynaamisten systeemit (DS) ovat käytännössä SD menetelmien perusta. Matemaattinen monimuotoisuus ja monimutkaisuus voi olla DS menetelmissä paljon suurempi kuin SD menetelmissä ja dynaamisten systeemien simulaatiotyökalut voivat ratkaista minkä tahansa SD ongelman paljon paremman tarkkuudella kuin niiden omat työkalut. Tunnetuimmat työkalut dynaamisten systeemien mallintamiseen ovat MATLAB™ ja Simulink™. (Borshchev & Filippov 2004)

Agenttipohjaiset menetelmät keskittyvät niin kutsuttuihin agenteihin, niiden toimien ja vuorovaikutuksen järjestykseen tietyn aikajakson aikana. Agentit voivat edustaa ihmisiä, organisaatioita, maita tai mitä tahansa sosiaalisen toimijan tyyppiä. Nämä toimijat saattavat toimia erilaisilla topologioilla ja oppia toimistaan. Jokainen agentti reagoi yhden tai useamman muun agentin edelliseen toimintaan tai mallin ympäristössä tapahtuneeseen muutokseen. Agenttipohjaisen mallin luomiseksi, mallintajan on ensin määriteltävä kunkin agentin peruskäyttäytyminen. Tyypillisesti tämä tehdään erilaisten yksinkertaisten sääntöjen sarjana, joita agentin on noudatettava. (Sokolowski et al. 2012, s. 17)

2.2 Simulointi tuotannossa

Yksi pääasiallisista simulointitekniikan sovelluskohteista on tuotannon sovelluksien simulointi. Tuotannon sovelluksiin sisältyy niin layout-suunnittelu, kuin koko yrityksen laajuinen toimitusketjun mallinnus (Miller & Pegden 2000). Jahangirian et al. (2010) tekemä taulukko (liite A) luettelee tarkemmin sovelluskohteita eri teollisuuden aloilta.

Law ja McComas (1998, s 49) listaavat seuraavalla tavalla tuotannon yleisimpiä, yksittäisiä ongelmia, joiden ratkomiseen simulointia hyödynnetään:

Laitteiston ja henkilöstön tarpeen arviointi

- laitteiden lukumäärä, tyyppi ja sijainti
- vaatimukset kuljetuksille, kuljettimille ja muulle tukilaitteistolle (esim. lavat ja kiinnikkeet)
- varaston puskureiden sijainti ja koko
- muutosten arviointi tuotantovolyymille
- uuden laitteen vaikutuksen arviointi olemassa olevassa valmistusjärjestelmässä
- pääomainvestointien arviointi
- työvoiman tarpeen suunnittelu
- työvuorojen määrän tarve

Suorituskyvyn arviointi

- läpivirta-analyysi
- välivaiheiden aika-analyysi
- pullonkaula-analyysi

Operaatio prosessien arviointi

- tuotantosuunnittelu
- varastointipolitiikat
- ohjausstrategiat
- luotettavuusanalyysi (esim. ennakoivan kunnossapidon vaikutus)
- laatukontrollipolitiikat

Ennen simuloinnin hyödyntämistä on siis ymmärrettävä Lawn ja McComasin (1998) mainitsemien ongelmien taustoja ja osattava vastata peruskysymyksiin simuloinnin kohteena olevasta tuotannosta. Seuraavaksi käsitellään lyhyesti mitä tuotannolla tarkoitetaan ja minkälaisista osasista se koostuu.

2.2.1 Tuotanto

Tuotteita ja teknologioita valmistavat yritykset tarvitsevat toimintoja, joilla raaka-aineista ja informaatiosta jalostetaan arvoa lisäävässä prosessissa asiakkaille hyötyä tuottavia ratkaisuja. Tuotanto terminä viittaa kaikkiin yrityksen toimintoihin, joita tarvitaan tuotteiden tai palvelujen aikaan saamiseksi. Laajasta määrittelystä huolimatta teollisen tuotannon ydinidea on kuitenkin toistettavuudessa ja tehokkuudessa. (Martinsuo et al. 2016, s. 134–135)

2.2.2 Tuotannontekijät

Tuotannontekijät ovat resursseja, jotka mahdollistavat tuotantotoiminnan. Keskeisimpiä tuotantotekijöitä ovat pääoma, työ, materiaalit ja tieto. Pääomalla tarkoitetaan esimerkiksi investointeja, jotka usein ovat toimitiloja, tuotantojärjestelmiä- ja prosesseja sekä yksittäisiä laitteita, koneita ja tietojärjestelmiä. Työ tarkoittaa yrityksen työntekijöiden työpanosta. Materiaalit ovat käytettäviä raaka-aineita, komponentteja sekä tuotantoprosessin kuluttamaa energiaa, vettä ja muita fyysisiä resursseja. Tieto on informaatiota, osaamista, lisenssejä ja patenteja, joita tuotanto edellyttää. (Martinsuo et al. 2016, s. 135)

2.2.3 Tuotannon periaatteet

Tuotannolla voi olla yhtiön strategiasta ja arvomaailmasta riippuvia periaatteita. On kuitenkin tiettyjä ajatusmalleja sekä peruseriaatteiden teemoja, joita kannattavaa toimintaa tekevän yrityksen on mietittävä. (Martinsuo et al. 2016, s. 134–136) Näistä tunnetuimpia ajatusmalleja ovat Lean ja Six Sigma, joiden idea perustuu jatkuvaan parantamiseen ja hukkan vähentämiseen. Tällä perusteella simulointia voidaankin pitää yhtenä Lean-ajattelun työkaluna. (Lapinleimu 2000, s. 38; Lean six sigma 2016)

Tuotannon ohjausperiaate on yksi keskeisimmistä periaatteista, jossa yritys voi lähteä liikkeelle varasto-ohjautuvasta (engl. make-to-stock, MTS) tai tilausohjautuvasta (engl. make-to-order, MTO) tuotannosta. Tuotannon jatkuvuus puolestaan liittyy eräkokoon ja toistuvuuteen. Tuotantoa voi olla yksittäiskappaleiden tuotannosta toistuvien erien sarjatuotantoon. Toistuvaa massatuotantoa, joka jatkuu samanlaisena pitkään, kutsutaan myös yhtenäistuotannoksi. (Martinsuo et al. 2016, s. 137) Tällaiset tuotannot soveltuvat yleensä hyvin diskreettien, tapahtumapohjaisten simulointimenetelmien sovelluskohteiksi. (Borhchev & Filippov 2014)

Tuotanto voidaan käsittää koostuvan valmistuksen perusyksiköistä, joissa materiaali jalostetaan tuotteeksi luvussa 2.2.2 esitettyjen tuotannontekijöiden avulla. Valmistuksen perusyksiköt voidaan asettaa topologisesti eri tavalla, joiden kokonaisuudesta syntyy tuotannon layout. (Lapinleimu 2000; Martinsuo et al. 2016)

2.2.4 Tuotannon mittarit

Tuotannon mittarit ovat tuloksia kuvaavia lukuja, jotka perustuvat mitattuihin tai muuten saatuihin kvantitatiivisiin lukuihin. Yleisesti mittarit voivat olla standardisoituja liiketaloudellisia tunnuslukuja tai yrityskohtaisesti räätälöityjä, tiettyyn tilanteeseen ja erikoistapaukseen soveltuvia. Ala-, yritys- ja tilannekohtaisten asioiden takia kaikenlaisille yrityksille yleispätevää mittarijärjestelmämallia ei ole mahdollista esittää kattavasti. Yleisesti voidaan kuitenkin sanoa, että eri mittarit pyörivät seuraavan taulukon asioiden yhteydessä. (Uusi-Rauva 1996)

Taulukko 1. *Taulukon pohjalta voidaan luoda erilaisia mittarikombinaatioita (Uusi-Rauva, 1996, s. 15).*

Määrä	Aika
Kustannus, tuotto	Laatu

Liikeryityksen toiminnassa tuotanto kuuluu reaali prosessiin. Reaali prosessille keskeisin ilmiö on tuottavuus. On siis tärkeää tuntea tuottavuuden osatekijät, jotta niitä voidaan mitata. Yleiskäsitteenä tuottavuudella tarkoitetaan tarkasteltavan järjestelmän tuotosten ja niiden aikaansaamiseksi järjestelmään käytettyjen panosten suhdetta, eli output per input. (Uusi-Rauva 1996)

Tuotannon ja tuottavuuden tunnuslukuesimerkeiksi Uusi-Rauva (1996, s. 20) listaa seuraavat:

- Myynti, liikevaihto tai jalostusarvo per työntekijä, päivä, tunti, kapasiteettiyksikkö jne.
- Suoritemäärä per työntekijä, päivä, tunti, kapasiteettiyksikkö jne.
- Materiaalien käyttö per suoritemäärä
- Asiakkaan keskimääräinen odotusaika
- Työnsuoritus aika per koko toimitusaika

- Kapasiteettitekijän käyttöaste
- Pilaantuneen materiaalin määrä prosentteina
- Jätteiden määrä per myynti
- Virheellisten suoritteiden määrä
- Materiaalin käsittelyvaiheiden määrä per kaikkien työvaiheiden määrä
- Energian käyttö per suoritelmäärä
- Myöhästyneet toimitukset per kaikki tilaukset

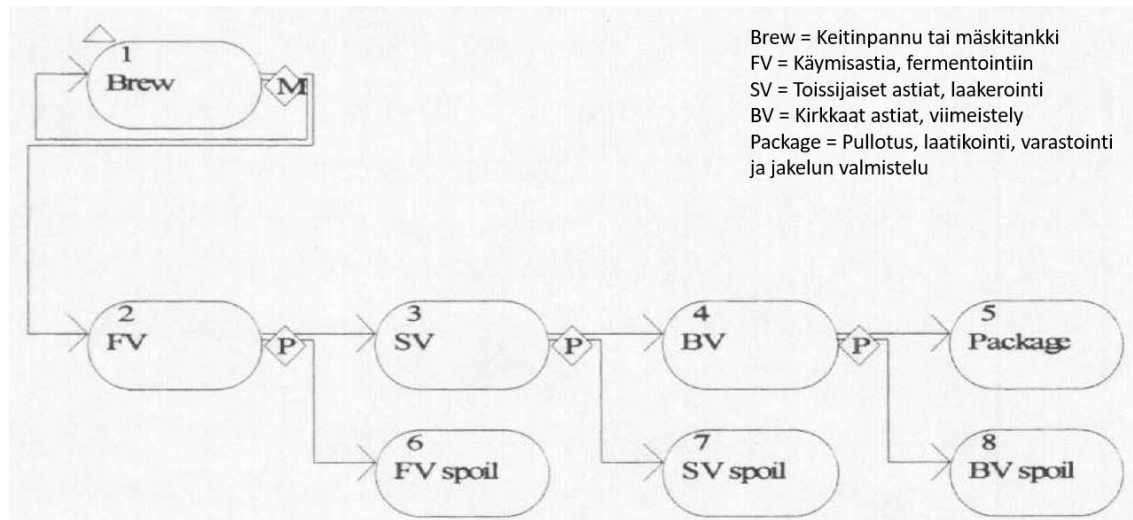
Käytännössä kaikkia Uusi-Rauvan (1996) tunnuslukuesimerkkejä voidaan tarkastella oikein rakennetun simuloinnin avulla, sillä nämä vastaavat myös Lawn ja McComasin (1998) listaamia simuloinnin avulla yleisesti tarkasteltavia tuottavuuden mittareita. On kuitenkin tärkeää tiedostaa, että kaikki mittarit eivät ole samanarvoisia yrityksen kannalta. Samoin kuin luvun 3.1 simuloinnin tavoitteiden ja ongelmien määrittelyn kohdalla, väärin perustein tai heikosti määritetyt tuotannon mittarit voivat koitua jopa haitallisiksi organisaatiolle. (Parmenter 2015, s. 25)

2.3 Esimerkkejä

Tässä kappaleessa esitellään esimerkkejä simuloinnin hyödyntämisestä tuotannossa. Esimerkeissä on pyritty esittämään simulointitutkimuksen kohde, menetelmä ja saavutukset mahdollisimman ytimekkäästi.

2.3.1 Kapasiteettisuunnittelu ja prosessianalyysi pienpanimossa

Yhdysvaltalaisessa pienpanimossa simulaatiomallin alkuperäinen tarkoitus oli määrittää maksimi panokapasiteetti kuukausituotannon tynnyreinä mitattuna. Kun malli oli kehitetty, sitä hyödynnettiin fyysisten rajoitusten, kuten pullonkaulojen paikantamiseen nykyisessä järjestelmässä. Mallia hyödynnettiin myös tehokkaan pääoman käytön arvioimiseksi (investointi kohteet), sekä kapasiteetin kasvatussuunnitelman laatimiseen tulevaisuuden myyntiennusteiden perusteella. Lisäksi mallia käytettiin nykyisten säiliöiden käyttöasteiden arvioitiin vaihtelemalla niiden sijaintia mallin sisällä. (Weston et al. 1999)



Kuva 5. Pienpanimon simulointimalli. "M" merkitsee useampaa iteraatiota panossa ja "P" merkitsee todennäköistä tulosta eri prosesseille. Muokattu lähteestä (Weston et al. 1999).

Mallinnuksessa hyödynnettiin tapahtumapohjaista simulointimenetelmää. Malli onnistui vahvistamaan, ettei nykyinen panimovarusiteiden layout ollut optimaalinen. Lisäksi "Mitä jos" -analyysin tuloksena yritykselle saatiin tehtyä laajentumissuunnitelma, joka osoittaa marginaalituotannon kullekin lisättävälle kapasiteettiyksikölle. Simulaatio osoittautui edulliseksi, tehokkaaksi ja vaikuttavaksi suunnittelutyökaluksi panimon johdolle. (Weston et al. 1999)

2.3.2 Henkilöstökapasiteetin tarpeen analysointi huoltoyksikössä

Simulaatiomallinnusta käytettiin henkilöstön kapasiteetin käytön tutkimiseen huoltoyksikössä, joka oli hajautettu kahteen fyysiseen osastoon A ja B. Syöteaineistoon sisältyi erilaisia työtilauksia erilaisilla suoritusajoilla, useita henkilöstöprofiileja työtilausten perusteella sekä erilaisia priorisointisääntöjä. Projektissa arvioitiin organisaation henkilöstöpolitiikan ja erilaisten työtilausten vaikutusta henkilöstön kapasiteetin käyttöön ja huoltotyötilausten läpimenoaikaan. (Mjema 2002)

Simuloinnissa käytettiin valmista ohjelmistopakettia, joka oli objekti- ja tapahtumakeskeinen simulaatiopaketti diskreettien tapahtumien simulointiin. Ohjelmistopakettilla oli alun perin suunniteltu tuotanto- ja valmistusprosessien simulointiin, mutta soveltui tässä tapauksessa myös henkilöstövirtauskaavion (liite B) mallintamiseen ja simulointiin. (Mjema 2002)

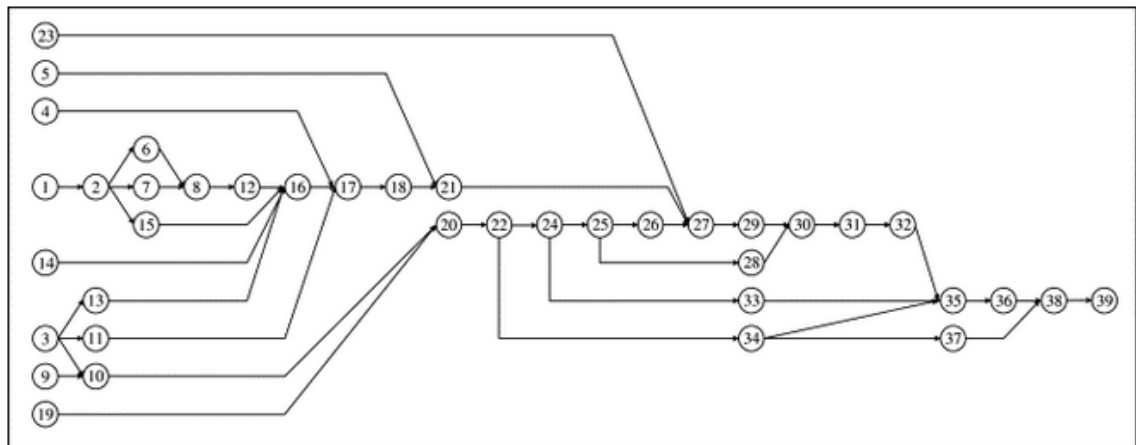
Simulaation tulokset osoittivat, että paras henkilöstön käyttöaste ja huoltotyötilausten läpimenoaika saavutetaan, jos huoltohenkilöstöä voidaan käyttää molempien osastojen

välillä. Simuloinnin avulla saatiin myös havainnollistettua kuinka erilaiset työtilaukset vaikuttavat huoltotöiden läpimenoaikaan. (Mjema 2002)

2.3.3 PC-kameran kokoonpanolinjan tasapainottaminen

Tutkimuksen kohteena oli PC-kameran kokoonpanolinjasto, joka kokoonpani ja pakkasi kolmea erilaista kameramallia. Simulointitutkimuksen tavoitteena oli luoda erilaisia linjastokonfiguraatioita vaihteleville kysyntätasoisille. (Mendes et al. 2005)

Eri linjastokonfiguraatioista luotiin ensin heuristiset mallit, jotka mallinnettiin markkinoilta saatavilla olevan tapahtumapohjaisen ohjelmiston valmiilla ominaisuuksilla. Malli validoitiin historiatiedon ja järjestelmäasiantuntijoiden kanssa tehtyjen sisältö- ja kriteerivalidointimenetelmien (asianomaisten kanssa tehtävät kvalitatiiviset menetelmät) avulla. Tutkimuksessa simulointiin yhteensä viittä eri skenaariota. (Mendes et al. 2005)



Kuva 6. Lähtökohdat kolmelle PC kameran versiolle, sisältäen kokoonpanon ja pakkauksen (Mendes et al. 2005).

Simulointitutkimus tarjosi erilaisia tehokkuuden mittatuloksia, kuten läpimenoaikoja ja resurssien käyttöasteita, joiden avulla linjaston konfiguraatiota pystyttiin hienosäätämään. (Mendes et al. 2005)

3. SIMULOINNIN TOTEUTUS TUOTANNOLLE

Martinsuo et al. (2016, s. 134) kirjoittavat eri yrityksillä olevan erilaisia toimintamalleja ja -prosesseja tuotannon toteuttamiseksi. On siis luonnollista, että myös simulointi on toteutettava tapauskohtaisesti, yrityksen toimintamallit ja prosessit huomioon ottaen.

Simuloinnin toteutus vaatii ymmärrystä aikaisemmissa luvuissa esitettyjen simulaatiomenetelmien lisäksi todennäköisyysteoriasta ja tilastotieteestä. Järjestelmän satunnaisuuden kohtuullinen mallintaminen on tärkeää, samoin kuin sopivan simulaatio-ohjelman valitseminen ja sen oikea käyttö. Mallin validointi ja uskottavuuden vahvistaminen ovat myös keskeisessä osassa simulointiprojektia. (Law & McComas 1991)

Simulointi voidaan toteuttaa yleiskäyttöisellä ohjelmointikielellä tai omalla simulointiin tarkoitettulla ohjelmistopakettilla. Yleisesti organisaation on järkevää käyttää simulointiin tarkoitettua ohjelmistopakettia projektin kokonaiskustannusten kannalta. On kuitenkin hyvä muistaa, että monimutkaisten järjestelmien validi simulaatiomallinnus edellyttää joka tapauksessa jonkinlaista ohjelmointia, riippumatta siitä käytetäänkö yleiskäyttöistä ohjelmointikieltä vai valmista simulointipakettia. (Law & McComas 1991)

3.1 Tavoitteiden ja ongelmien määrittely

Yksi tärkeimmistä simulaatiotutkimuksen osa-alueista on projektin tavoitteiden huolellinen määrittäminen. Usein simulaatioon perehtymättömillä ei ole ymmärrystä simulaation luonteesta, sen tarjoamasta tiedosta sekä onnistuneeseen projektiin tarvittavasta ajasta ja vaivasta. Siksi suositellaan, että asiasta pidetään asiantuntevan simulaatioanalyytikon kanssa vähintään tunnin seminaari asiaan kuuluvien johtajien ja insinöörien kanssa. (Law & McComas 1991; Banks 1998, s. 723)

- Tunnista olemassa olevan järjestelmän mahdolliset suorituskykyongelmat.
- Määrittele selvästi tutkimuksen yleistavoitteet ja myös 5-10 hyvin tarkkaa kysymystä, joita mallin avulla tarkastellaan.
- Päätä miten mallia käytetään päätöksenteossa (esim. uuden investoinnin päätöksentekoon).
- Määrittele mallin loppukäyttäjä, koska tämä vaikuttaa mallin käyttäjäystävällisyyteen (esim. kokenut ohjelmoija vs. tuotantoinsinööri).
- Määritä suorituskykymittarit, joita johto tulee käyttämään vaihtoehtoisten järjestelmäkonfiguraatioiden vertailemiseen. Malli saattaa pystyä antamaan tarkat arvot yhdestä mittarista, mutta ei toisesta.
- Rajaa tutkittavat järjestelmän konfiguraatiot, jotta uudelleen ohjelmointitarpeilta vältytään.

Kuva 7. Lawn ja McComasin (1991) muistilista onnistuneeseen aloituspalaveriin, muokattu lähteestä.

Law ja McComas (1991) suosittelivat yli vuosikymmenen kokemuksella omaa aloituspalaveria projektin tavoitteiden määrittelemiseksi, sillä on mahdotonta päättää sopivasta mallin yksityiskohtien tasosta tietämättä tarkalleen, mihin kysymyksiin mallin avulla halutaan vastata. On tärkeä tiedostaa, että yksi simulaatiomalli ei todennäköisesti pysty vastaamaan kaikkiin kysymyksiin tarvittavan tehokkaasti. Esimerkiksi tietokoneen suoritusvaatimusten vuoksi voi olla järkevää tarkastella yksityiskohtia omalla mallilla ja kokonaisuutta toisella (Law & McComas 1991). Tämä on yli 30 vuotta vanhasta lähteestä huolimatta edelleen relevanttia tapauskohtaisesti, sillä suurien järjestelmien mallit voivat edelleen olla raskaita atomitason simulointiin lisääntyneestä laskentatehosta huolimatta. Hyvä mallien jaottelu voi siis edelleenkin säästää merkittävästi resurssien käyttöä tai vapauttaa sitä muuhun käyttöön.

3.2 Tiedon keruu ja analysointi

Bangsow (2016, s. 4) luokittelee tuotannon simulointiin tarvittavan tiedon kolmeen kategoriaan: 1) Tekniset tiedot; 2) organisaatiotiedot; 3) järjestelmän kuormitustiedot. Taulukko 2 luettelee tarkemmin kunkin kategorian tietoja yleisellä tasolla.

Taulukko 2. *Simulointiin tarvittava data, muokattu lähteestä (Bangsow 2016, s. 4).*

Tekniset tiedot

Tehdasrakenteen tiedot	Layout
	Tuotantolaitteet
	Kuljetustoiminnot
	Kuljetusreitit
	Alueet
	Rajoitukset

Valmistustiedot	Käyttöaika Suorituskykytiedot Kapasiteetti
Materiaalivirtatiedot	Topologia Kuljettimet Kapasiteetit
Vikaantumistiedot	Toiminnalliset viat Saatavuus
Organisaatiotiedot	
Työaikajärjestelyt	Tauot Vuorot
Resurssien kohdentaminen	Työntekijät Koneet Kuljettimet
Organisaatio	Strategia Rajoitukset Onnettomuuksien hallinta
Järjestelmän kuormitustiedot	
Tuotetiedot	Työsuunnitelmat Materiaaliluettelo
Työtiedot	Tuotantotilaukset Kuljetustilaukset Volyymit Päivämäärät

Simulointianalyytikon tulisi kerätä tietoa järjestelmän käyttöohjeista ja ohjauslogiikasta. Tämä yleensä vaatii puhumista operaattoreiden, kone- ja tuotantoinsinöörien, managerien ja toimittajien kanssa. Epätarkat tiedot ja järjestelmän virallisten käyttöohjeiden puute yleensä monimutkaistaa asiaa. Tietoja on myös kerättävä malliparametrien (esim. kuljettimen nopeus) ja malliin syötettävien todennäköisyysjakaumien (esim. koneiden käyttö- ja korjausajat) määrittämiseksi. Yleisesti, jokaisen satunnaisuuden lähteen tulisi edustaa sopivaa todennäköisyysjakautta ja näiden oikeellisuus tulisi arvioida graafisilla vertailuilla ja tilastollisilla testeillä. (Law & McComas 1991)

Mikäli mahdollista, tietoa on myös kerättävä nykyisen järjestelmän suorituskyvystä, jotta mallin validointi myöhemmässä vaiheessa helpottuisi. Tätä voidaan tukea pitämällä kommunikointiyhteys projektin manageriin koko simulaatioprojektin ajan. Näin edesautetaan managerin investointia projektiin, jonka tietotaito auttaa mallin validointia ja uskottavuutta. (Law & McComas 1991; Banks 1998, s. 757)

3.3 Mallintaminen

Mallinnusvaihe sisältää simulointimallin rakentamisen ja testauksen. Mallinnus koostuu yleensä kahdesta vaiheesta, mallin hahmottamisesta konseptimalliksi ja sen siirtämisestä ohjelmointimalliksi. (Bangsow 2016, s. 4–5)

Alkupalaverien ja tiedon keruun avulla saatua ymmärrystä järjestelmästä syvennetään entisestään luomalla yleiskuvaa simulointimallista. Asetettujen tavoitteiden ja kerätyn tiedon pohjalta on validoitava simuloinnin tarkkuutta. Tarkkuusalueen avulla voidaan valita, mitä näkökohtia lähdetään yksinkertaistamaan. (Law & McComas 1991; Sokolowski et al. 2012, s. 14; Bangsow 2016, s. 5)

Ensimmäisessä vaiheessa on kaksi päätehtävää: 1) Analysoida ja pilkkoa mallinnettavan järjestelmän kompleksisuus; 2) vähentää ja tehdä yleistyksiä pilkotuista osista. Analyysin avulla järjestelmän monimutkaisuus puretaan simuloinnin tavoitteiden kannalta merkityksellisiin komponentteihin. Tavoitteena on eliminoida käytännön kannalta epärelevantit yksityiskohdat ja yleistää olennaisia yksityiskohtia. (Bangsow 2016, s. 5)

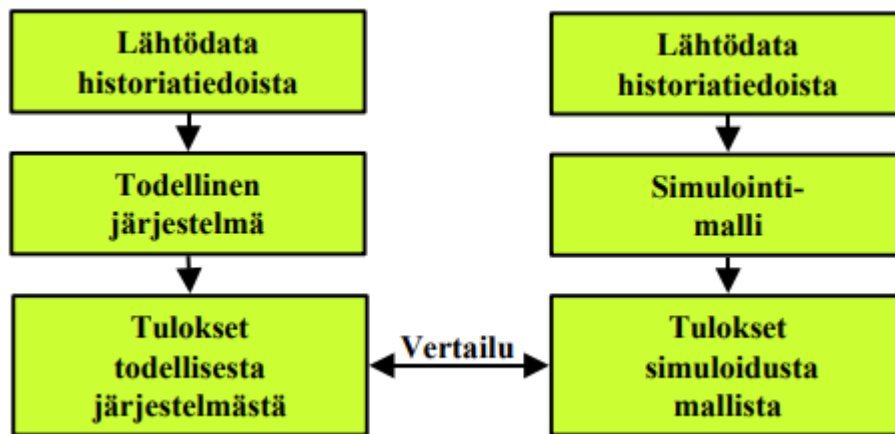
Kun ensimmäisen vaiheen pohjalta malli on johdettu, on syytä suorittaa rakenteellinen analyysi järjestelmäasiantuntijoiden kanssa. Tyypillisesti rakenteellisessa läpikäynnissä havaitaan ja korjataan virheellisiä mallin oletuksia, lisätään muutamia uusia oletuksia ja ratkaistaan joitakin yksityiskohtia yhdessä. Kokouksen päätteeksi on yleistä, että kaikki läsnäolijat kokevat mallin validiksi. (Law & McComas 1991)

Toisessa vaiheessa simulointimalli rakennetaan ja testataan. Mallin rakentamisen yhteydessä saatavat välivaiheet ja simulointimallin yksittäiset funktiot on syytä dokumentoida huolellisesti, jotta muutokset simulointimalliin olisivat mahdollisia myöhemmissä vaiheissa. Dokumentoinnin laiminlyönti voi aiheuttaa tilanteita, joissa malleja ei voida käyttää, koska sen toiminnallisuudesta ei ole tietoa. Asianmukaisella mallien selityksillä ja lähdekoodin kommentoinnilla varmistetaan, että toiminnallisuudet ovat edelleen ymmärrettävissä ohjelmoinnin valmistuttua. (Bangsow 2016, s. 5)

3.4 Validointi

Mallinnusvaiheen päätteeksi voidaan suorittaa pilottiajoja, joiden numeeriset tulokset ja animaatiot tulee arvioida huolellisesti järjestelmän asiantuntijoiden toimesta, jotta mahdollisesti jäljellä olevat virheet mallin oletuksissa voidaan havaita ja korjata. (Law & McComas 1991)

Simulaatiomallin validoimiseksi luotettavin testi on varmistaa, että sen tuottamat tulokset vastaavat läheisesti niitä tuloksia, joita odotettaisiin todellisesta (ehdotetusta) järjestelmästä. Tulosten vahvistamiseksi Averill Law (2015, s.262) ehdottaa viimeisimmässä simulaatio kirjassaan (Averill M. Law & Associates Inc. 2023) vertailua olemassa olevaan järjestelmään, järjestelmän asiantuntijoiden mielipiteisiin sekä toiseen malliin. Animaatiot ja visuaalinen esitystapa voivat olla merkittävässä roolissa validoinnin edesauttamisessa ja uskottavuuden luomisessa (Law 2015, s. 268).



Kuva 8. Korrelatiivinen tarkastelulähestymistapa (Nylund 2001, s. 57; Law 2015, s. 271).

Validointiin ei kuitenkaan ole täysin yksiselitteistä lähestymistapaa, mutta esimerkkejä tilastollisista menetelmistä vertailuun voivat olla kuvan 8 kaltainen korrelatiivinen tarkastelulähestymistapa (engl. inspection approach) tai itsenäiseen tietoon perustuva luottamusväilähestymistapa (engl. confidence-interval approach based on independent data) ja aikasarjalähestymistavat (engl. Time-series approaches). (Law & McComas 1991; Law 2015, s. 269–276) Nämä ovat myös Yhdysvaltain standardisointi- ja teknologiainstituutin (engl. National Institute of Standards and Technology, NIST) käyttämiä tilastollisen päättelyn keskeisiä lähestymistapoja. (NIST 2023)

3.5 Simulaatioiden suorittaminen

Simulointeja lähdetään suorittamaan asetettujen tavoitteiden ja suunnitelman pohjalta. Testisuunnitelmassa määritellään yksittäiset kokeet tuotantodatan, mallin argumenttien, tavoitteiden ja odotettujen tulosten osalta. Testiajojen löydösten perusteella voidaan määritellä aikajakso simulointikokeille, sillä useita tunteja kestävät tietokoneajot ja toistuvat kokeet tilastollisen kattavuuden saavuttamiseksi eivät ole harvinaisia. Näissä tapauksissa on hyödyllistä tarkistaa, onko eräajot mahdollisia. (Bangsow 2016, s. 5)

Law ja McComas (1991) suosittelevat eri parametreille vähintään 3–5 riippumatonta ajoa keskiarvon laskemiseksi. On myös erittäin tärkeää, että jokaisen kokeen syöte- ja tuotantotiedot sekä simulointimallin taustaparametrit dokumentoidaan (Bangsow 2016, s. 5).

3.6 Tulosten analysointi ja tulkinta

Tulosten analysoinnilla on kaksi pääasiallista tarkoitusta: 1) Määrittää tiettyjen järjestelmäkonfiguraatioiden absoluuttinen suorituskyky; 2) vertailla vaihtoehtoisia järjestelmäkonfiguraatioita suhteellisesti. (Law 2015, s. 70)

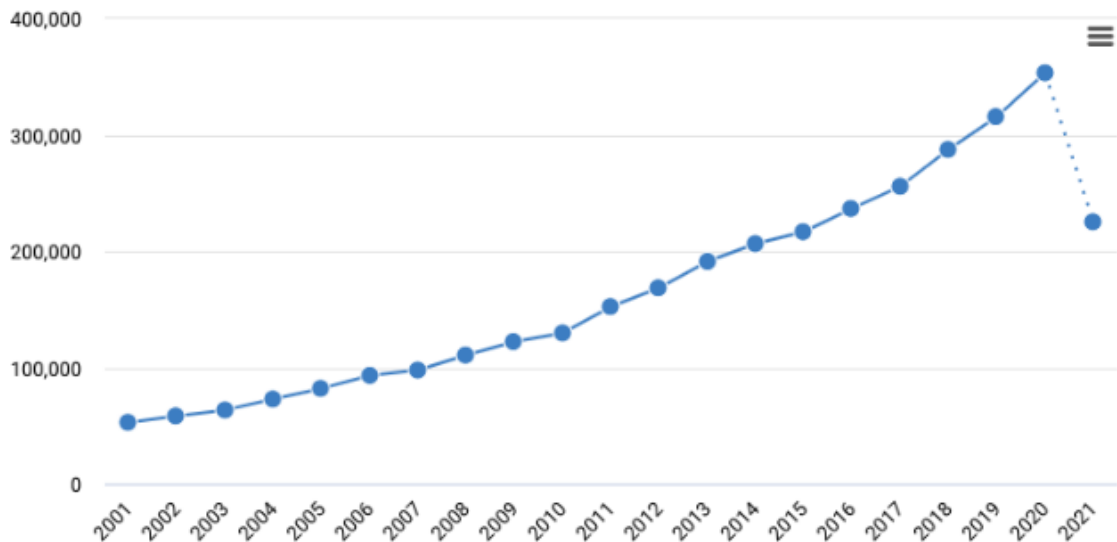
Lawn (2015, s. 488) mukaan monissa simulaatiotutkimuksissa käytetään paljon aikaa ja rahaa mallin kehittämiseen ja ohjelmointiin, mutta simulaation tuottaman datan analysoimiseen ei kiinnitetä juurikaan huomiota. Myös Lawn vuosikymmeniä aikaisempi artikkeli simuloinnin sudenkuopista McComasin kanssa (Law & McComas 1989) tukee tätä ajatusta. Bangsowkin (2016, s. 5) on samoilla linjoilla simulaation tulosten oikean tulkinnan ja analysoinnin merkittävästä vaikutuksesta koko tutkimuksen onnistumiseen. On ymmärrettävää, että simulaatio on tietokonepohjainen tilastollinen otantakokeilu, joka vaatii asianmukaisia tilastollisia menetelmiä sen tulosten analysoimiseen, että niillä olisi mitään merkitystä (Law 2015, s. 488–489).

3.7 Dokumentointi

Simulointitutkimuksen dokumentoinnissa suositellaan käytettäväksi projektiraportin kaltaista muotoa. Dokumentoinnin tulisi antaa yleiskuva tutkimuksen aikataulusta ja kirjata tehdyt työt. Tämän vaiheen intresseissä on dokumentoida epäonnistuneet järjestelmävariantit ja kokonaisuudet. Kuitenkin projektiraportin ytimen tulisi olla simulaatiotulosten esittely asiakkaan vaatimusmäärittelyn pohjalta. Luonnollisesti tässä yhteydessä tulisi kirjata ehdotuksia toimenpiteistä dokumentointiin. Lopuksi on suositeltavaa kuvailla simulaatiomallia sen rakenteen ja toiminnallisuuden osalta. (Bangsow 2016, s. 6)

4. TUOTANNON SIMULOINNIN TULEVAISUUS

Simulointiin liittyvät tutkimukset ovat vuosi vuodelta lisääntyneet (kuva 9). Laskentatehon sekä menetelmien kehitys on tuonut uusia tapoja ja työkaluja tuotannon simulointiin. (Mourtzis et al. 2014; Nguyen 2021)



Kuva 9. Simulointitutkimukseen liittyvät julkaisumäärät vuosilta 2001–2021. Vuoden 2021 tilasto on heinäkuuhun asti. (Nguyen 2021; Dimensions 2023)

Yksi merkityksellisimmistä trendeistä on digitaalinen kaksonen (engl. digital twin, DT). Kun simulaatio oli tiivistettynä tosielämän prosessin tai systeemin jäljitelmä ajan suhteen, DT edustaa ajassa tosielämän prosessia tai systeemiä. DT siis integroi simuloinnin lisäksi kaiken todellisuudessa olevan peilikuvansa (prosessin tai systeemin) tuottaman datan ja siihen liittyvät tiedot. Nämä tiedot saadaan suoraan antureilla ja muilla upoteuilla laitteilla, kuten esineiden internet (engl. Internet of Things, IoT) laitteilla. Tämä mahdollistaa tiedonkäsittelyn digitaalisen ekosysteeminsä sisällä, peilaten todellisuudessa tapahtuvaa tiedonkäsittelyä. (AAE Group 2021)

Tuotannon digitaalisen kaksosen kehittäminen on seuraava askel virtuaalitehtaiden (engl. virtual factory, VF) tutkimuksessa (Colledani et al. 2013). Päätaavoite on kuvata järjestelmän kompleksista käyttäytymistä huomioiden ulkoiset tekijät, ihmisten vuorovaiikutukset ja suunnittelurajoitukset. Rakehin et al. (2020) artikkeli ja heidän kokoama kirjallisuus vaikuttaa lupaavalta ja simulointipohjainen DT tulee varmasti tuomaan lisäetua siirryttäessä tuotantolaitosten digitalisaatiosta eteenpäin, kuten myös heidän artikkelinsa antaa ymmärtää.

Lisäksi tulevaisuudesta puhuttaessa huomionarvoista on Travis Hillin (2022) blogikirjoitus, jossa hän arvioi yhä useamman pienen ja keskisuuren tuotantoyrityksen hyötyvän simuloinnista tulevaisuudessa. Hän arvioi, että perinteisesti simulaatiot ovat olleet työläitä ja kalliita, mutta simulointityökalujen kehitys ja yleistymisen tuo aloituskynnystä matalammalle. Hill (2022) kirjoittaa, kuinka simulointi voidaan aloittaa pienistä projekteista ja rakentaa kohti kompleksisempia simulaatioita. Tämä on havaittavissa myös luvun 2.3 esimerkeistä. Hillin (2022) mukaan tällaisen menettelytavan tuomalle pidemmän aikavälin potentiaalille ei löydy vertaista työkalua tuotannon operaatioiden kehittämisessä.

5. YHTEENVETO

Tämä opinnäytetyö tutkii simulointia tuotannon kehittämisen työkaluna ja vastaa kysymyksiin mitä simulointi on ja mitä sillä voidaan savuttaa tuotannossa. Työssä käydään läpi mihin tuotannon simulointimallin rakentaminen perustuu ja kuinka simulointiprojekti viedään alusta loppuun onnistuneesti. Työssä on havainnollistettu tuotannon simulointitutkimusesimerkkien avulla mihin simulointia voidaan soveltaa ja mitä hyötyä siitä on.

Työssä selvitettiin, että simulointi ei ole vain kertamallinnusta jonkin investoinnin tai muutoksen vuoksi, vaan se voidaan sulauttaa päivittäiseen toimintaan. Tuotannon simulointi ei myöskään ole itsestään selvä työkalu, vaan vaatii resurssien lisäksi syvällistä ymmärtämistä simuloitavasta kohteesta ja sen ympärille rakennetusta prosessista. Tutkimuksessa havaittiin, että simulointiin sisältyy riippuen simuloitavasta systeemistä: Todennäköisyysteoriaa, tilastotiedettä, differentiaaliyhtälöitä, optimointiteoriaa ja peliteoriaa tai niiden kombinaatioita. Simulointiprojektia ei myöskään voida suorittaa alusta loppuun yksin, vaan vaatii projektin aikaista sosiaalista vuorovaikutusta asianomaisten kanssa.

Simulointi tieteenalana kehittyi jatkuvasti uusien tutkimuksien ja laskentatehon kehittyessä. Työssä havaittiin kuinka simulointiprojekti ei ole vain kvantitatiivista tutkimusta vaan tarvitsee osakseen kvalitatiivisia menetelmiä, tästä esimerkkinä mallin validointiin ei löydetty olevan yksikäsitteisiä menetelmiä.

Työn rajoitteena on, että vain neljään yleisesti tuotannon alalla käytettävää menetelmää tutkittiin tarkemmin, mutta niiden matemaattista teoriaa ei esitetty esimerkkien avulla yksityiskohtaisesti. Simulointimallin rakentamiseen tarvittavien työkalujen käsittelyä ei myöskään ehditty käymään läpi esimerkkien avulla.

Tämä opinnäytetyö antaa kuitenkin hyvän ymmärryksen simuloinnista tuotannon kehittämisen työkaluna ja tarkastelee aihetta kattavasti antaen erinomaiset lähtökohdat aiheen jatkotutkimuksia varten. Aiheeseen liittyvien tutkimusten määrän kasvusta huolimatta simuloinnin sovellus- ja tutkimusalueita on käytännössä rajoittamattomasti, eikä kaikkiin menetelmiin vielä edes ole täyttä tieteellistä vastausta.

LÄHTEET

- AAE Group (2021). *Simulations & Virtual Realty, Digital Twins and Augmented Reality Supporting Automation and Production Solutions (pt 2)*. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.4.2023): <https://www.aebv.com/news/simulations-virtual-reality-digital-twins-and-augmented-reality-supporting-automation-and-production-solutions-pt-2/>
- Averill M. Law & Associates, Inc. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 11.4.2023): <http://www.averill-law.com/simulation-book/>
- Bangsow, S. (2016). *Tecnomatix Plant Simulation Modeling and Programming by Means of Examples*. Springer International Publishing.
- Banks, J. (1998). *Handbook of Simulation - Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. John Wiley & Sons.
- Banks, J., Carson II, J.S., Nelson, B.L. & Nicol, D.M. (2010). *Discrete-Event System Simulation*. Pearson Education. New Jersey, USA.
- Borshchev, A. & Filippov, A. (2004). *From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools*. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society. Oxford, England.
- Clay Mathematics Institute, Navier-Stokes Equation. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): <https://www.claymath.org/millennium-problems/navier%E2%80%93stokes-equation>
- Colledani, M., Pedrielli, G., Terkaj, W. & Urgo, M. (2013). *Integrated Virtual Platform for Manufacturing System Design*. Istituto di Tecnologie Industriali e Automazione.
- Dimensions, Data. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.4.2023): <https://www.dimensions.ai/>
- Efthymiou, K., Papakostas, N., Mourtzis, D. & Chryssolouris, G. (2009). *Fluid Dynamics Analogy to Manufacturing Systems*, 42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems.
- Gleick, J. (2008). *Chaos: Making a New Science*. Penguin Group Inc. New York, USA.
- Gordon, G. (1978). *The development of the General Purpose Simulation System (GPSS)*. IBM Corporation.
- Hill, T. (2022). Simulation is a Window Into the Future of Your Manufacturing Operation. National Institute of Standards and Technologies. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu

12.4.2023): <https://www.nist.gov/blogs/manufacturing-innovation-blog/simulation-window-future-your-manufacturing-operation>

Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Stergioulas, L.K. & Young, T. (2010). *Simulation in manufacturing and business: A review*. European Journal of Operational Research.

Kawaguchi, K.H. (2003). *A Social Theory of International Law*. Springer Dordrecht.

Lapinleimu, I. (2000). *Ideaalitehdas: Tehtaan suunnittelun teorian kiteytys*. TTKK-PAINO.

Law, A.M. (2015). *Simulation Modelling and Analysis*. McGraw-Hill Education, USA.

Law, A. & McComas, M. (1989). *Pitfalls To Avoid In The Simulation Of Manufacturing Systems*. Industrial Engineering.

Law, A. & Kelton, W. (1991). *Simulation Modelling and Analysis*. McGraw-Hill Book Co.. USA.

Law, A. & McComas, M. (1991). *Secrets of successful simulation studies*. 1991 Winter Simulation Conference Proceedings.

Law, A. & McComas, M. (1998). *Simulation of Manufacturing Systems*. Winter Simulation Conference.

Lean six sigma (2016). BarCharts, Inc.

Maria, A. (1997). *Introduction to Modelling and Simulation*. Proceedings of the 29th conference on Winter simulation.

Martinsuo, M., Mäkinen, S., Suomala, P. & Lyly-Yrjänäinen, J. (2016). *Teollisuustalouden kehittyvässä liiketoiminnassa*. Edita Publishing Oy.

MBA Knowledge Base, Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 5.3.2023): <https://www.mbaknol.com/management-information-systems/types-of-systems/>

Mendes, A., Ramos, A., Simaria, A. & Vilarinho, P. (2005). *Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC camera assembly line*. Computers & Industrial Engineering.

Miller, S. & Pegden, D. (2000). *Introduction to manufacturing simulation*. 2000 Winter Simulation Conference Proceedings.

Mjema, E.A.M. (2002). *An analysis of personnel capacity requirement in the maintenance department by using a simulation method*. Journal of Quality in Maintenance Engineering.

Mourtzis, D., Doukas, M. & Bernidaki, D. (2014). *Simulation in Manufacturing: Review and Challenges*. CIRP Sponsored DET 2014 Conference.

- Nguyen, T.T.B. (2021). *Simulation modeling – An effective method in doing business and management research*. HCMCOUJS-Economics and Business Administration.
- NIST (2023). e-Handbook of Statistical Methods, E-book. Saatavissa (viitattu 17.4.2023): <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>
- Nylund, H. (2001). *Mallinnuksen ja simuloinnin käyttö kevytrakennetuotteen tuotettavuusanalyysissä*. Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- Oxford Languages, System. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.3.2023): <https://languages.oup.com/google-dictionary-en/>
- Parmenter, D. (2015). *Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs*. John Wiley & Sons, Inc. Canada.
- Piera, M.A., Ramos, J.J., Pascarella D.P., Gigante, G., Sanchez, M., Gracia, R., Munoz, J.L. & Duca, G. (2018). *D3.1 Modelling Paradigms*. European Union.
- Pidwirny, M. (2006). *Fundamentals of Physical Geography*. PhysicalGeography.net. E-book. Saatavissa (viitattu 5.3.2023): <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/contents.html>
- Rakesh, K.P., Priavrat, S. & Anubhav, D. (2020). *A review on simulation in digital twin for aerospace, manufacturing and robotics*. Department of Mechanical Engineering, Amity School of Engineering and Technology, Amity University Uttar Pradesh.
- Ronne, J. (2012). *Simulation: Overview and Taxonomy*. Department of Computer Science Carnegie Mellon University. Saatavissa (viitattu 11.4.2023): <http://www.cs.cmu.edu/~tcortina/15110sp12/Unit12PtB.pdf>
- Schmidt, C. & Taylor, R. E. (1970). *Simulation and Analysis of Industrial Systems*. RICHARD D. IRWIN, INC. Illinois, USA.
- Shishvan, M.S. & Benndorf, J. (2017). *Operational Decision Support for Material Management in Continuous Mining Systems: From Simulation Concept to Practical Full-Scale Implementations*. Minerals 2017.
- Sokolowski, J. A., Sokolowski, J. A. & Banks, C. M. (2012). *Handbook of real-world applications in modeling and simulation*. Wiley.
- Uusi-Rauva, E. (1996). *Ohjauksen tunnusluvut ja suoritusten mittaus*. Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- Weston, F. C., J., Herrmann, F. & Davidoff, P. H. (1999). *Capacity planning and process analysis a simulation study of a microbrewery*. Production and Inventory Management Journal.

LIITE A: SIMULOINNIN SOVELLUSKOHTEITA TUOTANNOSSA JA LIIKETOIMINNASSA

Table 4
Applications of simulation techniques in manufacturing and business.

Application	Simulation technique	Industry sector	A sample of Class A papers	No. of Class A papers	Total no. of papers (Class A + B + C)	
Assembly line balancing	DES	Computer hardware	[85]	1	1	
	Other hybrid techniques	Optic lens assembly	[142]	1	1	
Capacity planning	DES	Generic service industries	-	-	1	
		Generic part manufacturing	-	-	5	
		Pump production	-	-	1	
		Transformer manufacturing	[61]	2	2	
	SD	Beverages	[136]	1	1	
		Extruded food production	[96]	1	1	
		Electricity generation	-	-	1	
		Generic part manufacturing	-	-	1	
Other hybrid techniques	Financial/insurance and education	-	-	1		
Cellular manufacturing	Virtual simulation	Automotive	[94]	1	1	
Transportation management	DES	Urban traffic management	[111]	1	1	
		Stationary production	[90]	1	1	
		Concrete transport	-	-	1	
		Railway transport	[16]	1	1	
	ABS	General transport	-	-	1	
		Generic part manufacturing	-	-	1	
	Petri-net simulation	Traffic control, freeway traffic control	[17]	9	9	
	Traffic simulation	City logistics	-	-	1	
	Hybrid (SD&DES)	Traffic control	-	-	1	
		Highway traffic control, urban traffic control	[66]	4	5	
	Other techniques	Airport management	[130]	1	1	
		Travel navigation	[62]	1	1	
Facility location	Other hybrid techniques	Transportation	[63]	1	1	
Forecasting	SD	Aircraft manufacturing	[75]	1	1	
Inventory management	DES	Generic part manufacturing	-	-	3	
		Automotive	[110]	2	2	
		Construction	[101]	1	1	
		Chemical products	[83]	1	1	
	Monte Carlo simulation	Recycled parts	-	-	1	
		Insurance and education	[32]	1	1	
	Other techniques	Nuclear and spacecraft	-	-	1	
		Retailing	-	-	1	
	Just-in-time	DES	Generic part manufacturing	-	-	3
		Intelligent simulation	Generic part manufacturing	-	-	1
Process engineering-manufacturing	DES	Ship building	[98]	1	1	
		Automotive	[100]	3	3	
		Pharmaceuticals	[15]	1	1	
		Generic part manufacturing	[33]	2	7	
		Electronics	[109]	3	4	
		Aluminium gas cylinder	[42]	1	1	
		SD	Automotive	[25]	1	1
			Generic part manufacturing	-	-	1
	ABS	Generic part manufacturing	[69]	1	1	
		Generic part manufacturing	-	-	1	
	Monte Carlo simulation	Generic part manufacturing	-	-	1	
	Petri-nets simulation	Generic part manufacturing	-	-	1	
	Virtual simulation	Generic part manufacturing	-	-	1	
		Electronics	[22]	1	1	
		Generic part manufacturing	-	-	2	
		Electronics	-	-	1	
	Intelligent simulation	Generic process industry	-	-	1	
		Various manufacturing industries	[38]	1	1	
	Other techniques	Beverage	-	-	1	
		-	-	-	-	
Process engineering-service	DES	Retailing	-	-	1	
		Generic service industry	-	-	1	
		Printing	[40]	1	1	
		Consulting	[52]	1	1	
		Distribution	[71]	1	1	
		Container terminal	[114]	1	1	
		Construction waste handling	[27]	1	1	
		Construction	-	-	1	
		SD	Logistics	[8]	1	1
			Insurance	[1]	1	1
	Distributed simulation	Electricity generation	[73]	1	1	
		Information and communications	[119]	1	1	
		-	-	-	-	

(continued on next page)

Table 4 (continued)

Application	Simulation technique	Industry sector	A sample of Class A papers	No. of Class A papers	Total no. of papers (Class A + B + C)	
Workforce planning	Other hybrid techniques	Generic part manufacturing	-	-	1	
		Trading	[7]	1	1	
		Generic part manufacturing	-	-	2	
	DES	Packaging/machine manufacturing/iron metallurgy/apparel manufacturing/dairy	[79]	1	1	
		Franchised food	[50]	1	1	
Electronics		[115]	1	1		
Airplane manufacturing		[145]	1	1		
Maintenance management	Other hybrid techniques	Call centres	-	-	1	
		Steel production	[86]	1	1	
	DES	Generic part manufacturing	-	-	1	
Knowledge management	Monte Carlo simulation	Generic part manufacturing	-	-	1	
	Virtual simulation	Machine building	-	-	1	
	DES	Generic part manufacturing	[10]	1	1	
Project management	DES	Aircraft manufacturing	-	-	1	
		Construction	-	-	1	
		Generic part manufacturing	-	-	2	
	SD	Pharmaceutical	[137]	1	1	
		Aircraft maintenance	-	-	1	
	Monte Carlo simulation	Oil and gas	[19]	1	1	
		Chocolate	-	-	1	
		Construction	-	-	1	
		Software development	[5]	1	1	
		Consulting	-	-	1	
		SD	Semi-conductor manufacturing	[37]	1	1
			Software development	[108]	2	6
		Petri-net simulation	Generic projects	-	-	1
			Construction	[72]	1	1
			Software development	-	-	1
Construction	-		-	1		
Construction	[112]		1	1		
Organizational design	Intelligent simulation	Construction	-	-	1	
	Hybrid approach (DES&SD)	Software development	[81]	1	2	
	DES	Generic part manufacturing	-	-	1	
	SD	Pharmaceutical	[113]	1	1	
	ABS	Generic part manufacturing	-	-	3	
	Simulation gaming	Information and communications	[92]	1	1	
	Other hybrid techniques	Generic manufacturing	-	-	1	
Management training and education	Other techniques	Trading	[41]	1	1	
		Pharmaceuticals	[51]	1	1	
	DES	Education	[139]	1	1	
		Education/software development	[99]	1	1	
	SD	Education	[144]	2	3	
		Construction	[91]	1	1	
		Clinical instrument manufacturing	[64]	1	1	
	Simulation gaming	Distributed simulation	Education	-	-	1
		Virtual simulation	Education/construction	-	-	1
		Other hybrid techniques	Education	[78]	1	1
		Other techniques	Education	[47]	1	2
			Construction	-	-	1
Financial management	DES	Electronics	[122]	1	1	
		New-product-development	-	-	1	
	Monte Carlo simulation	Stock markets	[141]	1	1	
		Property	[48]	1	1	
		Accountancy	-	-	1	
Quality management	DES	Software development/education	-	-	1	
		Automotive	[30]	1	1	
	SD	Computer hardware	[124]	1	1	
		Construction	[67]	1	1	

LIITE B: HENKILÖSTÖN PROSESSIVIRTAUSKAAVIO

Analysis of
personnel
capacity

261

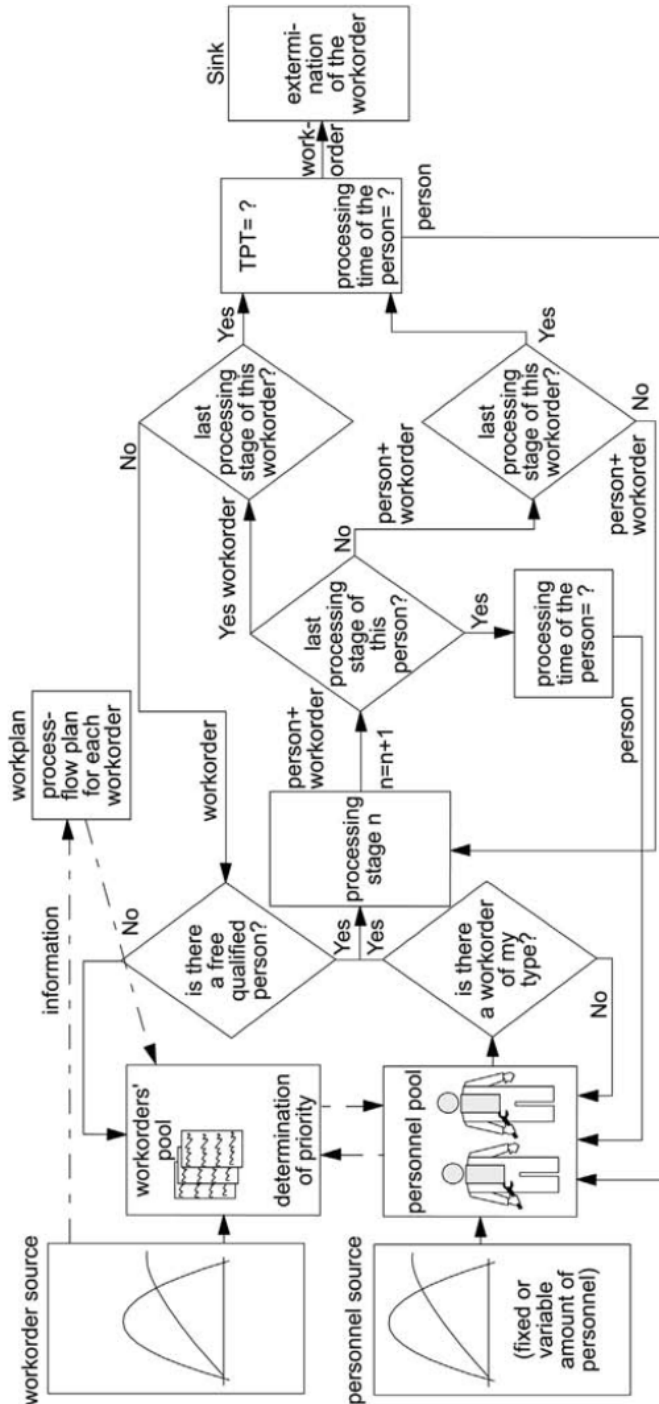


Figure 1.
Process flow chart