



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Topias Kujala

**Tuotantosimulaation hyödyntäminen uuden
tehtaan kapasiteettisuunnittelussa sekä
vaihtelunhallinnassa**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Diplomityö
Industrial Systems Analytics

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Topias Kujala		
Tutkielman nimi:	Tuotantosimulaation hyödyntäminen uuden tehtaan kapasiteetti-suunnittelussa sekä vaihtelunhallinnassa		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Tuotantotalous		
Työn valvoja:	Petri Helo		
Työn ohjaaja:	Jukka Konttas		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	90

TIIVISTELMÄ:

Uuden tuotantolaitoksen rakentaminen on aina yritykselle suuri ja tärkeä päätös. Päätöksenteko vaatii tietoa, resursseja ja ennen kaikkea rohkeutta. Tulevaisuuden epävarmuudet, kuten kysyntä- ja markkinamuutokset tekevät päätöksen tekemisestä haastavaa yrityksen johdolle. Uuden tuotantolaitoksen perustaminen on myös hyvä hetki tarkastella nykyistä toimintaa ja pyrkiä kehittymään. Tässä tutkimuksessa tuotetaan muuntajia valmistavalle Hitachi Energy Oy:lle arvokasta tietoa ja näkemyksiä uuden tehtaan tuotantojärjestelmästä päätöksenteon tueksi, hyödyntämällä simulaatio-ohjelmistoa. Erilaiset simulaatio-ohjelmistot ovat kehittyneet vauhdikkaasti ja soveltuvat nykyisin monipuolisesti tukemaan tuotantolaitosten ja tehtaiden suunnitteluprosessia.

Tutkimuksen ensimmäinen tavoite oli tutkia, onko uusi tuotantojärjestelmä tarpeeksi suorituskykyinen ja joustava täyttämään tulevaisuuden kasvutavoitteet. Toinen tavoite oli tutkia vaihtelunhallinnan keinoja tuotantojärjestelmässä. Tutkimuksessa käytetään FlexSim 25.1.3-ohjelmistoa simulaatiomallin rakentamiseen. Tutkimuksessa simuloitiin tuotantojärjestelmä, joka vastasi jo tehtyjä hankintoja ja arvioita erilaisista resurssitarpeista. Tulokset sisältävät yhteensä yhdeksän erilaisen skenaarion raportit. Skenaarioiden avulla testattiin muuntajatuotantoa uudessa tehtaassa. Simuloinnit voidaan kategorisoida neljään tutkimuskohteeseen, joita ovat puskurivarastojen, häiriöiden, tuottavuuden ja kysyntävaihtelun vaikutus tehtaan toimintaan. Vaihtelunhallinnan osalta tutkimuksessa haettiin kehitystä sisällyttämällä erilaisia tuotantofilosofioita simulaatioskenaarioihin.

Tutkimus osoittaa, että simulointimallin rakentaminen on hyödyllinen menetelmä tehdassuunnittelun tueksi ja auttaa hahmottamaan sekä ennustamaan erilaisia kuormitustilanteita. Simulointimallin avulla on helppo tarkkailla erilaisten parametrien vaikutusta ja optimoida tuotantojärjestelmää. Simulointiohjelmiston 3D-mallit toimivat visuaalisena avustuksena ja tarjoavat uudenlaisen kokemuksen tehdassuunnitteluun. Tutkimuksen tulokset osoittavat uuden tehtaan hankinnat ja suorituskyvyn riittäväksi useissa skenaarioissa. Tutkimuksen avulla paikannettiin myös mahdollisia ongelmakohtia tuotantojärjestelmästä ja ehdotettiin toimenpiteitä niiden korjaamiseksi. Simulaatiomalli osoitti myös sen, että Theory of Constraints (TOC) ja Critical Path Method (CPM) tuotantofilosofioiden sekä puskurien oikeanlainen soveltaminen muuntajatuotannossa auttaa hallitsemaan vaihtelua ja saavuttamaan parempia tuloksia.

AVAINSANAT: (Simulointi, Tuotanto, Suunnittelusta tilaukseen, Vaihtelunhallinta, FlexSim)

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations**

Author:	Topias Kujala		
Thesis title:	Utilizing production simulation in new factory capacity planning and variability management		
Degree:	Master of Science in Technology		
Degree program:	Industrial Systems Analytics		
Supervisor:	Petri Helo		
Instructor:	Jukka Konttas		
Year of graduation:	2025	Pages:	90

ABSTRACT:

Building a new production facility is always a big and important decision for a company. Decision-making requires knowledge, resources and, above all, courage. Future uncertainties, such as demand and market changes, make decision-making challenging for the company's management. Establishing a new production facility is also a good time to continue current operations and develop. This study provides Hitachi Energy Oy, a transformer manufacturer, with valuable information and insights into the production system of the new factory to support decision-making, by using a simulation software. Different simulation softwares have developed rapidly and are continuously versatile in supporting the design process of production facilities and factories.

The first objective of the study was to investigate whether the new production system has good performance and meets future growth goals. The second objective was to investigate methods for managing variability in the production system. The study uses FlexSim 25.1.3 software to build a simulation model. The study simulated a production system that corresponded to the purchases already made and estimates of appropriate resource needs. The results include a total of nine scenario reports. The scenarios were used to test transformer production in a new factory. The simulations can be categorized into four research areas, which are the impact of buffer stocks, disturbances, productivity and demand variability. Regarding variability management, the study sought development by incorporating different production philosophies into the simulation scenarios.

The study estimates that building a simulation model is a useful method to support plant design and helps to visualize and predict different load situations. The simulation model allows you to observe the effects of different parameters and optimize the production system. The 3D models of the simulation software act as a visual aid and provide new experience for plant design. The results of the study show that the new factory's acquisitions and performance are sufficient in several scenarios. The study also identified potential problem points in the production system and suggested measures to correct them. The simulation also showed that the best application of the Theory of Constraints (TOC) and CPM (Critical Path Method) production philosophies and buffers in the transformer production model helps to manage variability and achieve better results.

KEYWORDS: (Simulation, Production, Engineering-to-order, Variation Management, FlexSim)

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Hitachi Energy Oy:n ja Vaasan yliopiston välisenä yhteistyönä vuonna 2025. Diplomityön merkittävämpänä saavutuksena pidän toimivan ja validin simulaatiomallin aikaansaamista. Aihe oli itselleni mielenkiintoinen ja mukaansatempaava, mutta toisaalta haasteellinen. Simulaatiotutkimuksen mielenkiintoisimpana vaiheena pidin erilaisten skenaarioiden ja ilmiöiden tarkastelua. Haastetta aiheutti erityisesti tietokonehallinnus, joka synnytti kinkkisiäkin kysymyksiä ratkaistavaksi. Aito kiinnostus aiheeseen auttoi ponnistelemaan työtä eteenpäin aina valmiiksi saakka.

Haluan esittää kiitokset Vaasan yliopiston työn valvojalle professori Petri Helolle sekä Hitachi Energy Oy:n työn ohjaajalle operatiiviselle päällikölle Jukka Konttakselle heidän arvokkaista neuvoistaan ja ohjauksesta työn aikana. Lisäksi kiitän Hitachi Energy Oy:n sekä muiden sidosryhmien kaikkia mukana olleita henkilöitä asiantuntemuksesta ja avusta käytännön toteutuksessa. Erityiset kiitokset haluan välittää kehitysinsinööri Juhani Hirvikoskelle, Karinen Consulting Oy:n tuotantokonsultti Kimmo Kariselle ja Delfoi Consulting Oy:n sovellusasiantuntijalle Tomi Kosuselle, jotka ovat panostuksillaan mahdollistaneet laadukkaan ja merkityksellisen tutkimuksen.

Kiitos kuuluu myös perheelleni, avopuolisolleni ja ystävilleni tsemppauksesta ja tuesta niin tämän diplomityön, kuin muidenkin opintojen kaikissa vaiheissa. Kiitos myös minulle ahkeruudesta, kärsivällisyydestä ja siitä, että en luovuttanut.

Sisällys

1	Johdanto	10
1.1	Tutkimuksen tausta	11
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset	11
1.3	Tutkimuksen rakenne ja rajaus	12
2	Kirjallisuuskatsaus	13
2.1	Muuntajavalmistuksen perusteet	13
2.1.1	Tuoteperheet	14
2.1.2	Muuntajien keskeiset komponentit	17
2.1.3	Valmistusprosessi	19
2.2	Littlen laki ja tuotannon keskeiset mittarit	19
2.3	Tilastolliset jakaumat ja tunnusluvut	21
2.4	Lean ja Six Sigma	23
2.4.1	Lean-työkalut	24
2.4.2	Six Sigma DMADV	25
2.5	Engineering-to-order (ETO)	26
2.6	Tuotannonohjaus	28
2.7	Layout-suunnittelu	32
2.8	Simulaation teoria	36
2.8.1	Simulaation edut ja haasteet	37
2.8.2	Simulaation kulku	38
2.8.3	Simulaatiomallin verifiointi ja validointi	40
2.9	Kirjallisuuskatsauksen yhteenveto	41
3	Metodologia	43
3.1	Tutkimussipuli	43
3.1.1	Tutkimusfilosofia	44
3.1.2	Tutkimuksen lähestymistapa	44
3.1.3	Tutkimusstrategia	45
3.1.4	Tutkimusmenetelmän valinta	47
3.1.5	Tarkastelujakso	48

3.1.6	Aineistonkeruu ja analyysi	48
4	FlexSim-simulaatio- ja analyysiohjelmisto	50
4.1	FlexSim-ominaisuudet	50
4.2	FlexSim-käyttöliittymä	51
4.3	FlexSim-prosessinvirtaus ja logiikan ohjelmointi	53
4.4	Tulosten esittäminen FlexSimissä	57
5	Simulaatiotutkimuksen toteutus	60
5.1	Tutkimuksen vaiheet ja niiden toteutus	60
5.2	Simulaatioskenaariot ja tulokset	67
5.2.1	Skenaario 1 - Pienet puskurivarastot	68
5.2.2	Skenaario 2 - Suuret puskurivarastot	68
5.2.3	Skenaario 3 - Optimoidut/realistiset puskurivarastot	68
5.2.4	Skenaario 4 - Suuri häiriöaste	68
5.2.5	Skenaario 5 - Häiriötön tuotanto	69
5.2.6	Skenaario 6 - Tuottavuus heikkenee	69
5.2.7	Skenaario 7 - Tuottavuus paranee	69
5.2.8	Skenaario 8 - Kysyntävaihtelu SPT ja MPT välillä	69
5.2.9	Skenaario 9 - Kysyntävaihtelu Muut ja LPT välillä	70
5.3	Simulaatiotulosten analyysi	70
5.3.1	Puskurivarastojen vaikutus	70
5.3.2	Häiriöasteen vaikutus	72
5.3.3	Tuottavuuden vaikutus	73
5.3.4	Kysyntävaihtelujen vaikutus	75
5.3.5	Muut simulaation sovellutukset	77
6	Loppupäätelmät ja yhteenveto	78
6.1	Analyysin loppupäätelmät	79
6.2	Muutosehdotukset	80
6.3	Jatkotutkimuskohteet	82
	Lähteet	84

Liitteet	90
Liite 1. Simulaatiosuunnitelma (salattu Word-tiedosto)	90
Liite 2. Simulaatiodokumentaatio ja -tulokset (salattu Excel-tiedosto)	90
Liite 3. Kirjallinen raportti ja analyysi (salattu Powerpoint-tiedosto)	90

Kuvat

Kuva 1. Uuden tehtaan havainnekuva (Hitachi Energy news & events, 2025)	10
Kuva 2. Power Transformer (Hitachi Energy products and solutions, 2025)	15
Kuva 3. Reactor (Hitachi Energy products and solutions, 2025)	15
Kuva 4. Industrial (Hitachi Energy products and solutions, 2025)	16
Kuva 5. Offshore, subsea (Hitachi Energy products and solutions, 2025)	17
Kuva 6. Normaalijakauma (Pankkiasiat, n.d)	22
Kuva 7. Normaalijakauman funktioita (Matikkamatsku.com, 2018 mukailleen)	22
Kuva 8. Tuotantomuodot (Logistiikan maailma, 2025 mukailleen)	27
Kuva 9. Kriittisen polun ajoitusmenetelmä (Techt, 2015, s. 114)	29
Kuva 10. Perinteinen projektinhallinta (Techt 2015, s. 114)	30
Kuva 11. Havainnekuva puskurien hyödyntäminen (Techt, 2015, s. 42)	31
Kuva 12. Kiinteän paikan layout (Muther & Hales, 2015, s. 42)	33
Kuva 13. Tarkoitukseen perustuva layout (Muther & Hales, 2015, s. 42)	34
Kuva 14. Tuoteaseteltu layout (Muther & Hales, 2015, s. 43)	35
Kuva 15. Layout-suunnittelun vaiheet (Muther & Hales, 2015, s. 22)	36
Kuva 16. Simulointimallin verifiointi ja validointi (Robinson, 2011)	41
Kuva 17. Tutkimussipuli (Saunders ja muut, 2007)	44
Kuva 18. 3D-malli (FlexSim Software Products Oy, 2025)	52
Kuva 19. Prosessinvirtaustyökalu (FlexSim Software Products Oy, 2025)	52
Kuva 20. Tokeni (FlexSim Software Products Oy, 2025)	54
Kuva 21. FlexScript-ohjelmointikieli (FlexSim Software Products Oy, 2025)	55
Kuva 22. Source (FlexSim Software Products Oy, 2025)	55
Kuva 23. Resource (FlexSim Software Products Oy, 2025)	56

Kuva 24. Link (FlexSim Software Products Oy, 2025)	56
Kuva 25. Block (FlexSim Software Products Oy, 2025)	57
Kuva 26. Statistics (FlexSim Software Products Oy, 2025)	57
Kuva 27. Charts (FlexSim Software Products Oy, 2025)	58
Kuva 28. Templates (FlexSim Software Products Oy, 2025)	58
Kuva 29. Processing Time kaavio (FlexSim Software Products Oy, 2025)	59
Kuva 30. Esimerkkidata (Hitachi Energy Oy, 2025)	61
Kuva 31. Konseptimalli	62
Kuva 32. FlexSim 3D-malli	64
Kuva 33. FlexSim ProsessFlow	65
Kuva 34. FlexScript-ohjelmointikieli	66
Kuva 35. Jonojärjestys	73
Kuva 36. Läpimenoaika	73

Taulukot

Taulukko 1. Simulaatioparametrit esimerkkitaulukko	46
Taulukko 2. Työjonoparametrit esimerkkitaulukko	47
Taulukko 3. Tilastokategoriat (FlexSim Software Products Oy, 2025 mukailten)	59
Taulukko 4. Puskurit ja output	71
Taulukko 5. Puskurit ja KET	72
Taulukko 6. Puskurit ja läpimenoaika	72
Taulukko 7. Tuottavuus ja output	74
Taulukko 8. Tuottavuus ja KET	75
Taulukko 9. Tuottavuus ja läpimenoaika	75
Taulukko 10. SPT vs MPT	76
Taulukko 11. Muut vs LPT	76

Lyhenteet

ATO	Tilauksesta kokoonpanoon (Assemble to Order)
CONWIP	Vakioitu keskeneräisen työn ohjaus (Constant Work In Progress)
CPM	Kriittisen polun menetelmä (Critical Path Method)
DES	Diskreettitapahtumasimulointi (Discrete Event Simulation)
ETO	Suunnittelusta tilaukseen (Engineer to Order)
FIFO	Ensimmäisenä sisään, ensimmäisenä ulos (First In, First Out)
IoT	Esineiden internet (Internet of Things)
KET/WIP	Keskeneräinen työ (Work In Progress)
LPT	Large Power Transformer
MPT	Medium Power Transformer
MTO	Tilauksesta valmistus (Make to Order)
MTS	Varasto-ohjautuva tuotanto (Make to Stock)
SPT	Small Power Transformer
TOC	Esteiden teoria (Theory of Constraints)

1 Johdanto

Diplomityö toteutettiin toimeksiantona Hitachi Energy Oy:lle, joka on monipuolinen toimija kansainvälisesti ja maailman suurin muuntajien valmistaja. Yritys tuottaa myös automaatio- ja ohjelmistoratkaisuja sähköverkon hallintaan. Suomessa Vaasan tehtaalla on erikoistuttu erikoismuuntajien ja -reaktorien tuotantoon, suunnitteluun ja toimittamiseen. Vaasan tehdas on Suomen suurin ja merkittävin muuntajia valmistava tehdas ja viennin osuus sen tuotannosta on yli 90 % (Hitachi Energy Finland Oy, 2023). Yritys investoi liiketoimintaansa globaalisti vastatakseen kasvaneeseen kysyntään. Vaasan uuteen 30 000 neliömetrin muuntajatehtaaseen investoidaan 180 miljoonaa euroa ja uutta henkilöstöä rekrytoidaan arvioiden mukaan 200 henkilöä. Investointi kaksinkertaistaa muuntajien nykyisen tuotantokapasiteetin Suomessa sekä laajentaa nykyistä tuotevalikoimaa suurempiin muuntajiin. Lisäksi investointi vahvistaa yhtiön kykyä valmistaa ja huoltaa merkittävä osa Suomen kriittisen infrastruktuurin, kuten sähkön tuotannon, siirron ja datakeskusten muuntajista. Muuntajilla on keskeinen rooli vihreän energiasiirtymän edistämisessä. Tuotanto uudessa tehtaassa on tarkoitus aloittaa vuonna 2027 (Hitachi Energy Finland Oy, 2024).



Kuva 1. Uuden tehtaan havainnekuva (Hitachi Energy news & events, 2025)

1.1 Tutkimuksen tausta

Uuden investoinnin myötä muuntajien tuotantokapasiteetin on tarkoitus kasvaa nykytilanteeseen 2025 verraten kaksinkertaiseksi vuoteen 2031 mennessä. Tehtaan tuoteportfolio muuttuu ja laajenee investoinnin myötä. Tulevaa tuotantojärjestelmää halutaan tutkia ja analysoida etukäteen. Hitachi Energy Oy haluaa varmistaa, että tehdyt hankinnat ovat riittäviä ja toisaalta hankkia informaatiota mahdollisten lisäinvestointien tarpeellisuudesta. Tutkimuksella halutaan varmistaa, että uusi tehdas pystyy vastaamaan kasvutavoitteisiin. Tuotantojärjestelmän osalta Hitachi Energy Oy:n isoimpia haasteita ovat ETO-tuotannon ja kustomoitujen töiden synnyttämä vaihtelu, joka lisääntyy entisestään investoinnin myötä, kun uusia ja suurempia tuoteperheitä siirtyy valmistettavaksi Vaasan tehtaalle. Hitachi Energy Oy on laatinut ennusteita ja malleja pohjautuen historiaan, nykyiseen tilauskantaan sekä markkinaodotuksiin. Ennusteiden pohjalta tehtaan suuret linjat kuten rakennuksen pinta-ala ja muoto on voitu päättää sekä isompia laitehankintoja, kuten siltanosturit sekä kerosiiniuunit on voitu tilata ennen tutkimuksen aloittamista. Vastatakseen investoinnin myötä syntyneisiin tutkimus- ja analysointitarpeisiin Hitachi Energy Oy haluaa tuottaa tehdassimulaation. Tehdassimulaation avulla halutaan tutkia uuden tehtaan tuotantojärjestelmää, investointien riittävyyttä sekä vaihtelunhallintakeinoja.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Koska tutkimus toteutetaan osana Hitachi Energy Oy:n uuden tehtaan suunnitteluprosessia, olivat tutkimuksen tavoitteet ja tavoitteista johdettavat tutkimuskysymykset sellaisia, jotka tukevat projektia. Tutkimuksen tavoite oli luoda simulaatiomalli, jolla voidaan tarkastella muuntajatuotantoa ja analysoida, millaisia resursseja tuotanto tarvitsee saavuttaakseen tulevaisuuden liikevaihtotavoitteet ja toisaalta tarkastella millaisia tuotantopotentiaaleja uuden tehtaan investoinnit luovat. Toinen keskeinen tavoite on tutkia,

miten hyvin tuotantojärjestelmä kestää nykyisin esiintyvää ja toisaalta kasvavaa vaihtelua ja miten sitä voidaan hallita erilaisin keinoin, kuten puskurivarastoilla tai erilaisten tuotannonohjausfilosofioiden soveltamisella. Tutkimuskysymykset ovat:

- Onko uuden tehtaan kapasiteetti riittävä vastaamaan tulevaisuuden kasvu- ja myyntiennusteisiin?
- Miten hyvin uusi tehdas kestää nykyisenkaltaista vaihtelua ja miten sitä voidaan hallita?

1.3 Tutkimuksen rakenne ja rajaus

Diplomityö koostuu kuudesta luvusta. Ensimmäisessä luvussa esitetään kokonaisjohdanto tutkimukselle. Toisessa luvussa tutustutaan aiheeseen kirjallisuuskatsauksen avulla. Kirjallisuuskatsaus auttaa ymmärtämään tutkimukseen liittyviä teorioita, määritelmiä ja kaavoja. Luvussa kolme esitellään tutkimusmetodologia. Luvussa neljä esitellään simulointiohjelmisto yleisesti. Luvussa viisi käydään läpi simulaatiotutkimusta sen keskeisiltä osin ja esitellään skenaariot, tulokset sekä analyysi. Luvussa kuusi esitellään johtopäätökset ja ehdotukset jatkotutkimuskohteista.

Tutkimus rajautuu tehdassimulaatioon ja tuotannonvirtauksen mallintamisessa vastaamaan noin 60 % tehtaan toiminnoista. Simulaatioon on mallinnettu tuotteiden valmistuksen kannalta kriittinen polku. Simulaatio on yksinkertaistettu malli ja keskittyy erityisesti työaikoihin, vaihteluun ja kapasiteettiin. Tutkimus rajoittuu tuoteperheisiin SPT, MPT, LPT, Reactor, Industiral, Offshore. Yhteisenä nimittäjänä tutkimuksen tuoteperheille toimii virtaus pitkälti samojen toimintojen ja toimitilojen läpi, sekä ristiin hyödynnettävät resurssit. Tutkimuksessa simuloidaan uutta tehdasta sen täydellä kapasiteetilla ja arvioidaan sen toimintaa erilaisissa skenaarioissa. Koska tutkimus on luonteeltaan tapaututkimus ja tehty toimeksiantona Hitachi Energy Oy:lle, joitakin yksityiskohtia ja parametreja ei julkaista tai ne käsitellään yleisellä tasolla luottamuksellisuussyistä.

2 Kirjallisuuskatsaus

Tässä luvussa käydään läpi tutkimukseen liittyviä teorioita. Kirjallisuuskatsauksen tehtävänä on luoda teoreettinen pohja tutkimustyölle ja auttaa ymmärtämään tehtyä tutkimusta paremmin. Tutkimuksen ympäriltä löytyy paljon relevantteja aiheita, joista kirjallisuuskatsaukseen on pyritty valitsemaan teorioita, jotka tukevat itse simulaatiotutkimuksen vaiheita ja prosessia. Lisäksi kirjallisuuskatsaukseen on valittu aihealueita, jotka kiinnostivat Hitachi Energy Oy:tä.

Valikoituneista aiheista ensimmäisenä on muuntajavalmistuksen perusteet, jotta lukijan on helpompi ymmärtää tuotetta ja järjestelmää, jota simuloidaan. Toisena kirjallisuuskatsauksessa tutkittiin tuotannon keskeisiä mittareita ja tilastollisia käsitteitä niiltä osin, jotka ovat simulaatiotutkimuksen kannalta oleellisia. Muuntajatehtaan tuotanto perustuu engineering-to-order (ETO) -tuotantomalliin, jonka vuoksi siihen tutustutaan kirjallisuuskatsauksen muodossa. ETO-tuotantomalli aiheuttaa tuotantoon merkittävästi vaihtelua, jonka hallitsemiseen etsitään tällä tutkimuksella ratkaisuja. Hitachi Energy Oy:n toiveista käsiteltiin tuotannonohjauksen kappaleessa rajoitteiden teoria (TOC), kriittinen polku (CPM) ja puskurivarastojen hyödyntämisen teoria. Lean ja Six Sigma ovat merkittävä osa Hitachi Energy Oy:n toimintakulttuuria ja tiiviisti mukana simulaatiotutkimuksessa ja hyödynnettyihin sovellutuksiin on tutustuttu kirjallisuuskatsauksena. Kirjallisuuskatsauksessa käsitellään myös layout-suunnittelua ja sen vaiheita, sillä se asettaa tiettyjä reunaehtoja simulaatiolle ja toisaalta simulaation havainnot konkretisoituvat tulevaan layoutiin. Itse simulaatiota ja sen prosessia sekä teoriaa käsitellään kirjallisuuskatsauksen viimeisessä kappaleessa.

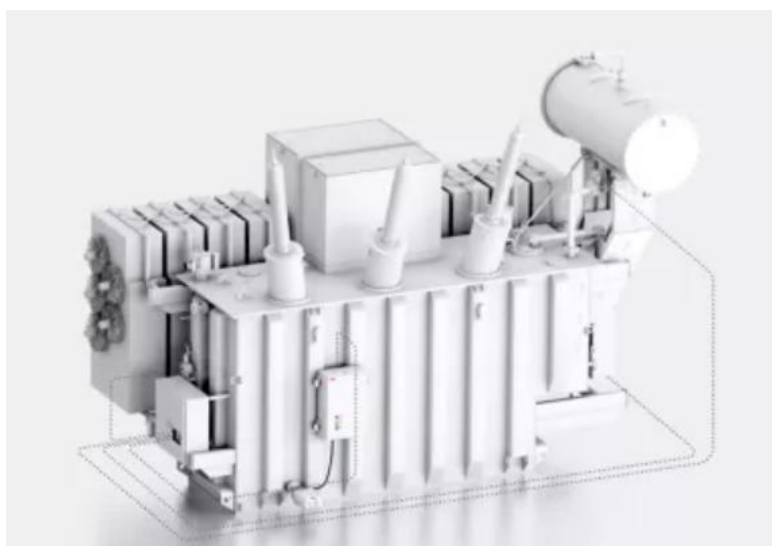
2.1 Muuntajavalmistuksen perusteet

Tässä kappaleessa esitellään perusteet eri muuntajatyypeistä, muuntajan komponenteista ja valmistusprosessista. Muuntaja on yli 100 vuotta vanha keksintö, jonka perusrakenne on säilynyt muuttumattomana ja siihen kuuluu magneettisesti johtava sydän sekä

sähköisesti johtavat käämit (ABB, 2016, s. 4). Vaasan tehtaalla valmistetaan useita erityyppisiä muuntajia eri käyttötarkoituksiin ja toimintaympäristöihin. Tässä työssä esitellään tuoteperheet siinä muodossa kuin ne Vaasan tehtaalla jaotellaan ja niiltä osin, jotka tämän tutkimuksen kannalta ovat keskeisiä. Tuoteperheitä ovat eri kokoluokan muuntajat, reaktorit (Reactor), teollisuusmuuntajat (Industrial) sekä meriolosuhteisiin tarkoitettu (Offshore) muuntajat. Vaasan tehtaalla tuotetaan myös merkittävä määrä tuulivoima- ja rautatiemuuntajia, mutta ne on rajattu ulos tästä tutkimuksesta. Tehtaalla tuotetaan myös erilaisia erikoismuuntajia sekä tuotteita, joita voi olla vaikea kategorisoida alla mainittuihin tuoteperheisiin. Simulaatiotutkimukseen tuoteperheitä on yhdistelty ja jaettu hieman uudelleen ja soveltaen, eivätkä ne täysin vastaa alla esitettyjä.

2.1.1 Tuoteperheet

Muuntajaa kutsutaan toisinaan kokoluokan mukaan nimityksillä Small-, Medium- tai Large Power Transformers nimityksellä tai lyhenteillä SPT, MPT ja LPT. Tällaisia muuntajia käytetään tavanomaisessa sähkönsiirrossa. Ne muuttavat esimerkiksi jännitettä korkeasta 110 kilovoltin sähköverkosta matalampaan 20 kilovoltin sähköverkkoon tai toisinpäin. Keskeiset komponentit perusmuuntajassa ovat: sydän, käämit, sisäinen kiskotus ja kytkin, säiliö ja kansi, jäähdytysjärjestelmä, paisuntasäiliö sekä eristimet (ABB, 2016, s. 3).



Kuva 2. Power Transformer (Hitachi Energy products and solutions, 2025)

Reaktori on tuote, jonka avulla sähköverkon virtaa rajoitetaan ja sen avulla hallitaan jännitettä. Reaktorin käyttö on yleistä sähköverkon osissa, joissa on tarpeellista kompensoida reaktiivista tehoa tai vaimentaa niin sanottuja yliaaltoja. Rakenteellisesti reaktorit eroavat muuntajista sydämen rakenteen osalta ja käämien määrä on usein pienempi (*Hitachi Energy työohje, 2023*).

**Kuva 3. Reactor (Hitachi Energy products and solutions, 2025)**

Industrial-tuoteperheellä eli tehdasmuuntajatuoteperheellä viitataan teollisuuden erityistarpeisiin valmistettaviin muuntajiin. Tällaisia voivat olla esimerkiksi valokaariuunimuuntajat, jotka toimivat suurella virralla ja kestävät kuormitusvaihtelua tai niin sanottu start-up-muuntajat, joiden avulla voidaan käynnistää suuria moottoreita (ABB, 2016, s. 34).



Kuva 4. Industrial (Hitachi Energy products and solutions, 2025)

Offshore-tuotteilla viitataan muuntajiin, joita käytetään merellisissä olosuhteissa. Offshore-tuotteita käytetään esimerkiksi kaasunporauslautoilla tai merituulipuistoissa. Tuoteperheen erityispiirteet liittyvät olosuhteisiin, ja niitä ovat esimerkiksi kompakti rakenne tilan säästämiseksi, paloturvallisuuden huomioiminen eristysnesteissä ja korroosiota vähentävät ratkaisut (ABB, 2016, s. 34).



Kuva 5. Offshore, subsea (Hitachi Energy products and solutions, 2025)**2.1.2 Muuntajien keskeiset komponentit**

Rautasydän ohjaa magneettivuon muuntajatyypille valittujen käämien läpi. Sydän valmistetaan raudasta ja siinä on 2–3 pylvästä, sekä ala- ja yläikeet. Pylväät ja ikeet valmistetaan latomalla ohuita rautalevyjä päällekkäin. Alaies ja pylväät ladotaan suoraan yhteen ja yläies myöhemmin kokoonpanossa, jotta käämit voidaan laskea pylväille. Sydämen koko määräytyy ensisijaisesti muuntajan tehon mukaan, koska poikkipinta-alan suuruus on riippuvainen tehosta (ABB, 2016, s. 14).

Muuntajien käämit ovat rakenteeltaan erilaisia riippuen muuntajan tehosta sekä käämin jännitteestä ja virrasta. Muuntajassa on aina vähintään ala- ja yläjännitekäämit. Käämiin johdettu sähkövirta synnyttää magneettikentän, joka magnetisoi muuntajan rautasydämen. Käämit valmistetaan pyörittämällä perinteisesti kupari- tai alumiinilankaa käämilieriön päälle. Vaasan tehtaalla valmistettavia käämityyppisiä ovat seuraavat:

- Foliokäämit
- Kerroskäämit
- Laippakäämit
- Ruuvikäämit
- Lieriökäämit

(ABB, 2016, s. 15–16).

Eristysosat muuntajassa voidaan jakaa karkeasti kahteen kategoriaan, joista ensimmäinen on kiinteät eristeet, esimerkiksi lasikuitu, paperi, puu ja prespaani. Toinen kategoria on eristysnesteet eli muuntajaöljy. Muuntajaöljyjä on monia erityyppisiä, joista yleisimmin käytettävät ovat hiilivety pohjainen mineraaliöljy sekä synteettinen esteri MIDELE. Eristysosien tarkoitus on suojata muuntajaa jännitteen aiheuttamilta rasitteilta (ABB, 1998).

Sisäinen kiskotus ja johdotus koostuu muuntajissa käämien ulosottojen liittamisestä läpivienteihin sekä säätöjohdotuksesta. Sisäisen johdotuksen tehtävä on siirtää virtaa käämien ja läpivientien välillä. Yläjännitepuolen virransiirtoon käytetään enimmäkseen kuparikaapeleita. Alajännitepuolen suuria virtoja siirretään kuparikiskojen avulla (ABB, 2016, s. 17).

Aktiiviosalla tarkoitetaan kokonaisuutta, jossa rautasydäimestä, käämeistä, kiinteistä eristysosista ja sisäisestä kiskotuksesta ja johdotuksesta on koottu yhteinen komponentti. Aktiiviosa muuttaa jännitettä ja siinä on aina yläjännite, joka on muuntajan suurin jännite ja alajännite, joka on pienin jännite (ABB, 2016, s. 17).

Säiliö ja kansi suojaavat muuntajaa ja toimivat sen runkona sekä eristys- ja jäähdytysnesteen säiliönä. Säiliön ja kannen ominaisuudet muodostuvat muuntajan kohdesijainnin mukaan riippuen ulkoilma- ja ympäristöolosuhteista. Säiliö toimii myös muuntajan jäähdyttimenä ja siinä täytyykin olla tarpeeksi jäähdytispinta-alaa tai ulkoisia jäähdytysmekanismeja, kuten radiaattorit tai vesijäähdytys (ABB, 2016, s. 18–19).

Paisuntasäiliön tehtävä on toimia muuntajaöljyn paisuntatilana. Öljy reagoi lämpötilan vaihtumiseen muuttamalla tilavuuttaan. Tätä tilavuuden vaihtelua hallitaan paisuntasäiliön avulla, johon laajentuva öljy voi tilapäisesti siirtyä ja näin vältetään paineen muodostuminen muuntajan säiliöön (ABB, 2016, s. 19).

Läpivientien avulla muuntaja kytketään sähköverkkoon. Läpiviennit asennetaan useimmissa tapauksissa muuntajan kannelle. Yleisin läpivientityyppi on posliiniläpivienti ja muita läpivientityyppejä ovat pistoke- ja kiskoläpivienti (ABB, 2016, s. 19).

Muuntaja voi sisältää monipuolisia lisävarusteita, joilla varmistetaan sen toiminta ja voidaan osoittaa tarpeen tullessa vikoja. Yleisimpiä lisävarusteita ovat jäähdytysjärjestelmä, virtamuuntajat, kaasurele, ylipaineventtiili, lämpömittari, ilmankuivain, öljynkorkeuden osoitin ja DGPT2-suojalaite (ABB, 2016, s. 20).

2.1.3 Valmistusprosessi

Tehtaan valmistusprosessi etenee yksinkertaistetusti seuraavassa järjestyksessä Hitachi Energy Oy:n ja muuntajatehtaan sisäisen tuotantokortin (2025) mukaan:

1. Sydämen valmistus
2. Käämintä
3. Käämien kalustus
4. Kokoonpano
5. Puolivalmismittaukset
6. Uunitus ja säiliöinti
7. Loppukalustus
8. Koestus
9. Lähetys

Huomioitavaa on se, että kyseinen järjestys on hyvin yksinkertaistettu versio, joka kuvaa kriittisen polun projekteille. Tuotteen valmistusprosessi saattaa sisältää huomattavasti useampia työvaiheita, joita suoritetaan vaiheiden rinnalla, ja joissain tapauksissa tuotantojärjestys voi olla hyvinkin poikkeava kuvattuun valmistusprosessiin verraten.

2.2 Littlen laki ja tuotannon keskeiset mittarit

Littlen laki on keskeinen matemaattinen työkalu, joka yhdistää monia tuotannon keskeisiä mittaushetkiä. Laki on käytössä monissa Lean-sovelluksissa. Littlen laki soveltuu parhaiten standardoituun tuotantoon, mutta sitä voidaan käyttää myös vaihtelevassa tuotannossa. Alla esitellyssä kaavassa L = tavaroiden lukumäärä järjestelmän sisällä, λ = tavaroiden keskimääräinen saapumisnopeus järjestelmään ja sieltä ulos ja W = keskimääräinen aika, jonka tuote viettää järjestelmässä (Six Sigma, 2025).

$$L = \lambda * W$$

Keskeneräinen työ tunnetaan lyhenteellä KET. Se tarkoittaa keskeneräisiä tuotteita tuotannossa. Keskeneräisiksi lasketaan työt, jotka sitovat kapasiteettia, resursseja ja käyttävät tuotantotilaa (Karrus 2001, s. 77). Littlen lakia soveltaen keskeneräinen työ voidaan laskea kaavalla:

$$\text{KET} = \text{läpäisykyky} \times \text{läpimenoaika}$$

Yksinkertaistettu tuotannon läpimenoaika sisältää prosessiajan eli tuotteen valmistusajan sekä jonotusajan. Jonotusajalla tarkoitetaan aikaa, jonka tuote odottaa ennen seuraavaa työvaihetta (Nordmeyer, 2025). Läpimenoaika voidaan myös jakaa tarkemmin. Kun yleistä prosessia tarkastellaan yksittäisen tuotteen näkökulmasta, otetaan huomioon siirtoaika, jonoaika, asennusaika, käsittelyaika, erän odotusaika (aika, jonka yksittäinen tuote odottaa, jotta erä valmistuu), odotusaika erässä (aika, jonka yksittäinen tuote odottaa, jotta erä työstetään) ja odotusaika (aika, jonka tuote odottaa prosessin muita osia) (Hopp & Spearman, 2011, s. 327). Littlen lakia soveltaen läpimenoaika voidaan laskea kaavalla:

$$\text{Läpimenoaika} = \text{KET} / \text{läpäisykyky}$$

Läpäisykyvyllä tarkoitetaan tuotteen tuotosta prosessin aikayksikköä kohden. Toisinaan puhutaan suoritusnopeudesta tai yksikköajasta. Läpäisykykyä lasketaan usein keskiarvona ja siihen otetaan huomioon vain virheettömät tuotteet (Hopp & Spearman 2011, s. 229). Littlen lakia soveltaen läpäisykyky voidaan laskea kaavalla:

$$\text{Läpäisykyky} = \text{KET} / \text{läpimenoaika}$$

Kapasiteetti kuvastaa tuotantolaitoksen tai tehtaan suorituskyvyn ylärajaa. Se on tärkeä mittari, koska kapasiteetin ääri rajoilla tai sen ylitoimiessa syntyy lieveilmiönä ongelmia ja epävakautta, ja toisaalta käyttämättä jätetty kapasiteetti on kuluerä, jonka takia kuormitusasteen tulisi olla korkea (Hopp & Spearman 2011, s. 229). Kapasiteettia mitataan

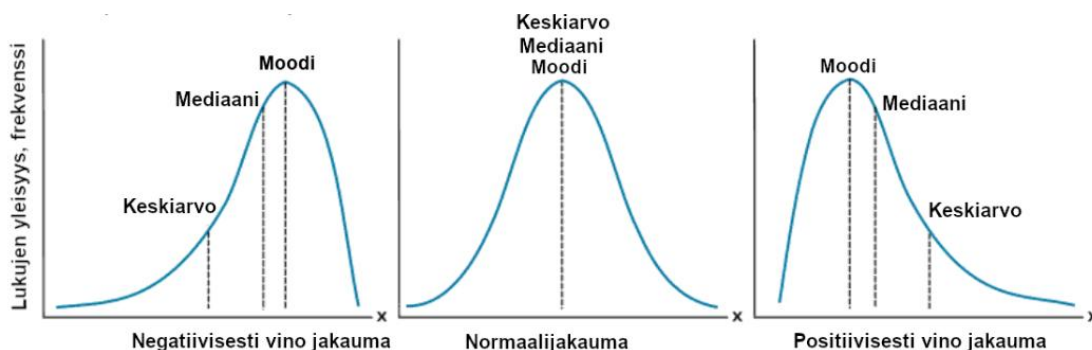
aikayksikköä vastaan. Esimerkiksi kokoonpanon kapasiteetti voi olla 80 tuntia viikossa tai prosessin kapasiteetti 200 kappaletta tunnissa. Kapasiteetin käyttöä voidaan tarkastella kuormitussuhteen avulla alla olevan kaavan mukaan. Kuormitussuhteen rinnakkaistermejä ovat käyttöaste ja käyttösuhde (Kouri ja muut, 2009, s. 399–401). Toisinaan laskentatoimessa koko tehdasta tarkastellessa puhutaan tuotantosuhteesta, joka lasketaan alla olevan kaavan mukaan (Saari 2006, s. 244).

$$\text{Kuormitussuhde} = (\text{kuormitus} \times 100 \%) / \text{kapasiteetti}$$

$$\text{Tuotantosuhde} = (\text{tuotantomäärä} \times 100 \%) / \text{kapasiteetti}$$

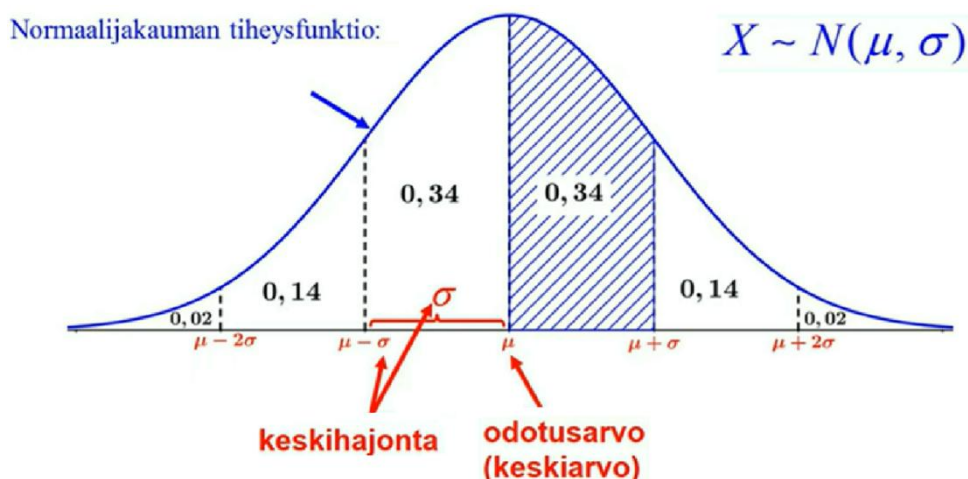
2.3 Tilastolliset jakaumat ja tunnusluvut

Tässä kappaleessa käydään läpi tilastollisia käsitteitä, jotka ovat keskeisiä työn ymmärtämisen kannalta. Tutkimuksessa keskilukuja on hyödynnetty simulaatiomallin konseptimallin rakennuksessa. Tutkimuksessa on myös hyödynnetty erilaisia todennäköisyysjakaumia, esimerkiksi simulaatiossa eri vaiheiden kestojen satunnaisuuden mallintamiseen ja toisaalta lopputuloksena saatua dataa esitellään osittain todennäköisyysjakaumien ja histogrammien muodossa. Matemaattiset kaavat kootusti kappaleen lopussa. Keskilukuja ovat keskiarvo, mediaani ja moodi (Läärä 2011, s. 2). Keskiarvo saadaan laskettua kaavan (1) mukaan (Taulukot.fi, 2025). Mediaani on suuruusjärjestykseen lajiteltujen lukujen keskimäinen luku kaavan (2) mukaan. Mikäli lukuja on parillinen määrä, mediaani on kahden keskimäisen luvun keskiarvo kaavan (3) mukaan (Läärä 2011, s. 5). Moodilla tarkoitetaan jakauman lukua tai lukuja, jotka toistuvat useimmiten (Nokelainen 2014, s. 3). Kuvasta kuusi voidaan hyvin havaita, miten eri keskiluvut sijoittuvat normaalijakaumassa ja vinoutuviissa jakautumissa.



Kuva 6. Normaalijakauma (Pankkiasiat, n.d)

Normaalijakauma tarkoittaa arvojen jakautumista odotusarvon eli keskiarvon ympärille. Tätä kuvataan keskihajonnalla. Normaalijakauman muoto saadaan muodostettua normaalijakauman tiheysfunktion avulla. Kuva seitsemän havainnollistaa normaalijakaumaa (Törmälehto, n.d., s. 2). Normaalijakaumalla on tiettyjä ominaisuuksia, jotka on syytä osata huomioida: näitä ominaisuuksia ovat vinous ja huipukkuus. Vinous kuvaa jakauman vaakapoikkeamaa oikealle tai vasemmalle ja tätä voi havainnoida kuvasta kuusi. Huipukkuus taas kuvaa miten terävähuippuinen jakauma on (Nokelainen 2014, s. 8).



Kuva 7. Normaalijakauman funktioita (Matikkamatsku.com, 2018 mukailen)

Kokoelma kappaleessa läpikäydyistä kaavoista:

Keskiarvo (Taulukot-verkkosivu, 2025).

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (1)$$

Mediaani parillinen (Läärä, 2011).

$$Md = \frac{x(n+1)}{2}, \quad (2)$$

Mediaani pariton (Läärä, 2011).

$$Md = \frac{\left(x \frac{n}{2} + x \frac{n}{2} + 1\right)}{2}, \quad (3)$$

Normaalijakauma (Maol, 2016).

$$X \sim N(\mu, \sigma), \quad (4)$$

Normaalijakauman tiheysfunktio (Maol, 2016).

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (5)$$

Keskihajonta (Maol, 2016).

$$\sigma = \sqrt{\sum_i p_i (x_i - \mu)^2}, \quad (6)$$

Odotusarvo (Maol, 2016).

$$\mu = \sum_i p_i x_i, \quad (7)$$

2.4 Lean ja Six Sigma

Lean on alun perin peräisin Japanista ja saanut alkunsa Toyotan tehtailta. Toyota pyrki nostamaan tehtaiden tuottavuutta ja vähentämään turhaa työtä. Toisen maailmansodan jälkeen Japanissa täytyi pärjätä niukalla pääomalla eikä esimerkiksi amerikkalaistyylinen

massatuotanto ollut mahdollista Japanin markkinoilla. Toyota kehitti tuotantomenetelmän, jolla saavutettiin parempi kustannustehokkuus. Näistä uusista oivalluksista alkoi hiljalleen muodostua Lean-ajattelu. (Six Sigma -verkkosivut, 2025). Lean-tuotannossa asiakaslähtöisyys on avainasemassa ja tavoite on tuottaa asiakkaalle lisäarvoa mahdollisimman tehokkaasti poistamalla tuottamatonta tekemistä mahdollisimman paljon. Lean-ajattelussa tuotantoprosessi pyritään pitämään mahdollisimman yksinkertaisena ja selkeänä. Koko yrityksen henkilöstön, niin työntekijöiden kuin johtoryhmän, on tärkeää sitoutua Lean-ajatteluun ja jatkuvan parantamisen periaatteisiin. Vaatimuksena sitoutuminen organisaation joka tasolla on suuri, mutta vaikutus on merkittävä (Miettinen 1993, s. 61–62).

Six Sigma-menetelmä on saanut alkunsa Motorola-yhtiöstä Yhdysvalloista. Yrityksellä oli vakavia taloudellisia haasteita, jotka perustuivat pitkälti laadullisiin haasteisiin. Motorolan insinöörit alkoivat kehittämään järjestelmää, joka perustuisi systemaattiseen tapaan vähentää valmistusvirheitä. Järjestelmän nimi juontaa tavoitteeseen saavuttaa vain 3,4 virhettä miljoonassa otoksessa, mikä vastaa kuuden sigman keskihajontaa (Vivekananthamoorthy & Sankar, n.d.). Simulaatiotutkimuksessa ja sen logiikassa on hyödynnetty monia Lean-työkalusta tuttuja periaatteita, sekä datan keräyksessä Six Sigma-analyysimenetelmän muunnelmaa DMADV.

2.4.1 Lean-työkalut

5S on järjestelmä, jossa luodaan järjestystä ja poistetaan hukkaa. Menetelmä perustuu viiteen vaiheeseen: sortteeraus (seiri), järjestä (seiton), puhdistus (seiso), standardisointi (seikutsu) ja ylläpido (shisuke) (Munro ja muut, 2015, s. 351).

Visual Factory eli visuaalinen tehdas, joka hyödyntää visuaalisuutta tuotannonohjauksessa, jotta kuka tahansa voi havainnoida nopeasti, mikä on prosessin tila ja toimiiko prosessi halutusti (Munro ja muut, 2015, s. 351).

Kaizenin avulla prosessia pyritään parantamaan jatkuvana toimintana. Kaizenin sisällä voidaan tehdä erillisiä keskitettyjä ja tehostettuja parannuksia tiettyyn kehityskohteeseen. Näitä kutsutaan nimellä Kaizen blitz (Munro ja muut, 2015, s. 351).

Kanban tarkoittaa signaaliohjausta, jossa tietty toimenpide, kuten osan valmistus tai materiaalin siirto aiemmasta vaiheesta seuraavaan toteutetaan halutulla signaalilla. Kanban rajoittaa varastoja ja varmistaa, ettei viallisia osia etene prosessissa eteenpäin (Munro ja muut, 2015, s. 352).

CONWIP eli constant work in progress on kanbanin tapaan signaaleilla toimiva ohjausjärjestelmä, mutta se toimii asettamalla kiinteän enimmäismäärän samanaikaisille tehtäville tai varastotasoille (SixSigma.us, 2024).

Total productive maintenance eli kokonaisvaltainen tuotannonkunnossapito tarkoittaa kokonaisvaltaisesti tuotannon laitteiden ja tilojen ennaltaehkäisevää kunnossapitoa, jotta tuotannonvirtausta voidaan suunnitella hyvissä ajoin (Munro ja muut, 2015, s. 353).

Standard work tarkoittaa standardoituja työvaiheita ja työaikoja. Standardisoitu työ hyödyttää esimerkiksi kapasiteetti- ja resurssisuunnittelua ja auttaa löytämään tehokkaimman toimintojen yhdistelmän (Munro ja muut, 2015, s. 353).

Pull system eli imuohjaus tarkoittaa tuotantotekniikkaa, jossa materiaali sijoitetaan käyttöpisteen läheisyyteen ja materiaalin täydennystä tehdään vain sen verran, kun prosessi kuluttaa (Munro ja muut, 2015, s. 353).

2.4.2 Six Sigma DMADV

DMADV-mallia käytetään, kun tuotetta ja prosessia ei ole vielä olemassa. Menetelmä sopii erityisen hyvin tilanteisiin, joissa suunnitellaan uutta prosessia. DMADV-mallin vaiheet ovat Munron ja muiden (2015, s. 51) mukaan:

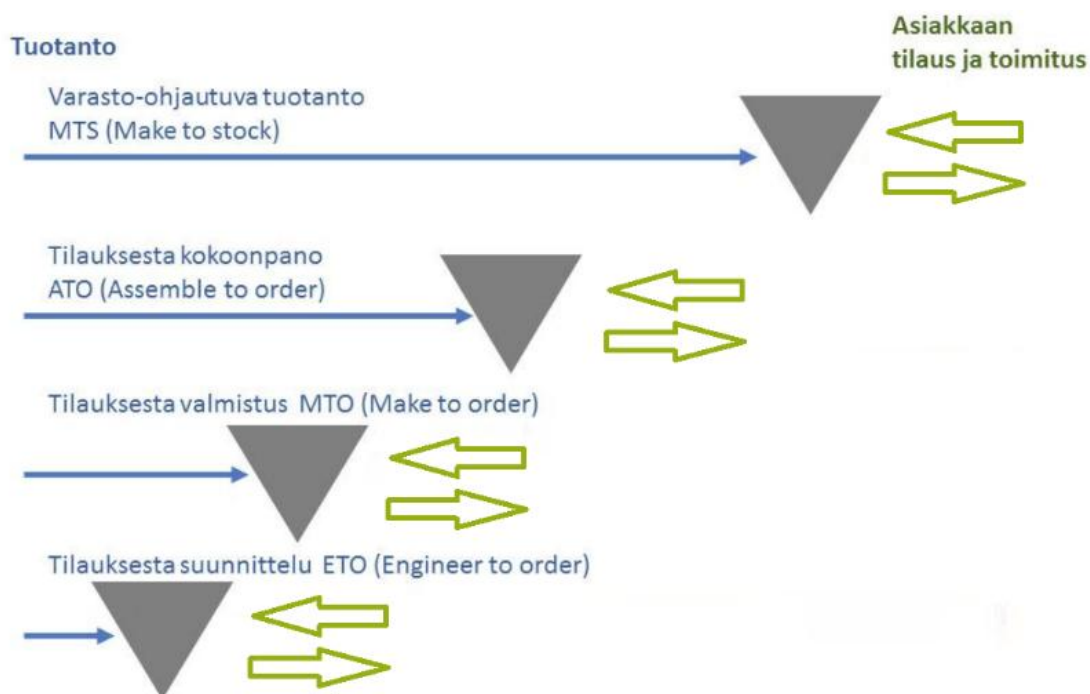
1. Define (määrittely): Ennen suunnittelun aloitusta valittu tiimi arvioi ja priorisoi ensisijaiset suunnittelutavoitteet. On tärkeää kohdistaa keskittyminen oikeisiin tavoitteisiin.
2. Measure (mittaus): Tunnistetaan suunnittelukriteerit, huomioidaan säännöt ja kaikkien sidosryhmien odotukset. Kerätään pohjatieto.
3. Analyze (analyysi): Six Sigmassa keskiössä on tilastolliset ja tutkivat menetelmät, joilla varmistetaan luotettavuus. Analyysi auttaa hahmottamaan suunnitteluprioriteetteja.
4. Design (suunnittelu): Six Sigma -periaatteiden mukaisesti, kun tavoitteet ovat selvillä, työskentely toimivan lopputuotteen, kuten prosessin tai laadunvalvontamenetelmän eteen aloitetaan. Tässä vaiheessa määritellään tarkat spesifikaatiot.
5. Verify (varmennus): Lopuksi lopputuotetta tai prosessia testataan ja validoidaan. Tärkeää on löytää ja korjata viat ja arvioida riskit.

2.5 Engineering-to-order (ETO)

Engineering-to-order tarkoittaa tilauksesta suunnitteluun toteutettavaa tuotantojärjestelmää (Gosling & Naim, 2009, s. 741). ETO on noussut suosituksi tuotantojärjestelmäksi, koska se soveltuu erinomaisesti teollisuuden aloille, joilla on korkea räätälöintiaste ja perinteiset ja standardoidut ratkaisut eivät toimi. ETO-järjestelmälle on ominaista, että jokainen projekti ja tuote suunnitellaan erikseen. Tuotteiden volyymit ovat matalia ja tuoterakenne voi olla monimutkainen (Hicks ja muut, 2000, s. 182). Tuotteen suunnittelu aloitetaan vasta, kun tilaus on varmistunut tai tilausvaiheessa. Usein asiakas saattaa olla mukana suunnitteluprosessissa ja luomassa määritelmiä, minkä takia tuotantoa tai lo-

pullista suunnittelua ei voida aloittaa ennen tilauksen varmistumista. Tuotantojärjestelmissä puhutaan tilauksen kohdennuspisteestä, englanniksi decoupling point tai order penetration point, jolla tarkoitetaan vaihetta, jonka jälkeen tuotteella on asiakas. ETO-järjestelmässä piste on syvimmällä järjestelmässä, mikä erottaa sen toisista järjestelmistä (Gosling & Naim, 2009, s. 741–744). ETO-järjestelmässä asiakaslähtöisyys on omaa luokkaansa, sillä jokainen tuote suunnitellaan yksilöllisesti asiakkaan tarpeen mukaan. Tämä johtaa myös monimutkaisempaan tuotannonohjaukseen ja resurssienhallintaan. ETO-järjestelmässä ei voida ennakoida ja laskelmoida kapasiteetteja yhtä helposti, kuin toisissa järjestelmissä (Hicks ja muut, 2000, s. 181–183).

Muita tuotantomalleja ovat MTS-varasto-ohjautuva tuotanto, ATO-tilauksesta kokoonpanoon, MTO-tilauksesta valmistukseen. Toimintamallien keskeinen ero on tilauksen kohdennuspiste, jolla tarkoitetaan vaihetta, jossa tuote kohdennetaan tietylle asiakkaalle. Toimintamalleja voi havainnoida kuvasta kahdeksan (Logistiikan maailma, 2025).



Kuva 8. Tuotantomuodot (Logistiikan maailma, 2025 mukailen)

ETO-tuotanto voidaan jakaa selkeästi kahteen eri vaiheeseen, joita ovat ei-fyysinen ja fyysinen. Näistä ensimmäinen on ei-fyysinen vaihe, joka pitää sisällään esimerkiksi tarjouspyyntöjen käsittelyn, suunnittelun, insinööriyön ja projektin kokonaisvaltaisen suunnittelun. Fyysinen vaihe pitää sisällään konkreettisia asioita, kuten valmistuksen, kokoonpanon, toimituksen ja loppuasennukset. ETO-prosessille tyypillistä on alkuperäisen tuotantosuunnitelman tai aikataulun muutos, johtuen uudelleensuunnittelusta tai odottamattomista häiriöistä ja siksi on tärkeää, että ETO-järjestelmä on joustava ja helposti uudelleensuunniteltava ja -ajastettava (Mathew & Johansson, 2023, s. 81–83).

Asiakasohjautuvasta ETO-tuotannosta tekee haastavan ja vaikeasti hallittavan tuotantomuodon vaihtelun ja epävarmuuden suuri määrä (Gosling & Naim, 2009, s. 741–744). Vaihtelu voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin ja niistä jokainen vaikuttaa tuotannossa esiintyvän vaihtelun määrään. Ensimmäisenä on asiakkaan aiheuttama vaihtelu. Asiakas saattaa haluta muokata suunnitelmaa, aikataulua tai muita määrityksiä projektin aikana. Toisena on suunnittelun aiheuttama vaihtelu, jota aiheuttaa projektikohtainen suunnittelu ja vakioitujen ratkaisuiden puute tai satunnaisuus. Kolmantena vaihtelun aiheuttajana on itse tuotantoprosessi eli tuotannon aiheuttama vaihtelu. ETO-tuotannossa on vaikea luoda alussa tarkkoja arvioita vaadittavista resursseista ja siitä, miten pitkään vaiheet vievät toteutuessaan todellisessa ympäristössään (Bertrand & Muntslag, 1993, s. 3–6). Näihin kolmeen vaihtelua aiheuttavaan tekijään voidaan vaikuttaa tuotannonohjauksella.

2.6 Tuotannonohjaus

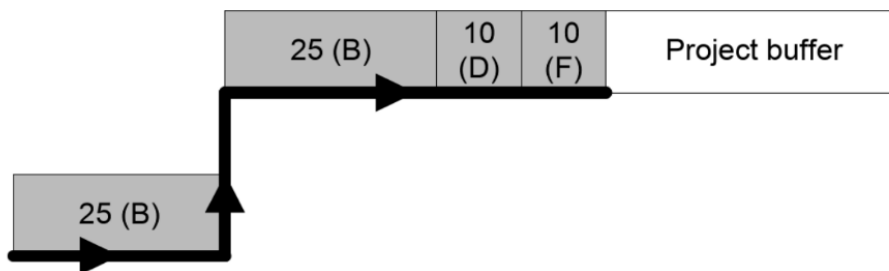
Rajoitteiden teoria eli TOC tai suoraan Theory of Constraints on ohjaus- ja johtamisjärjestelmä, joka perustuu järjestelmän tehokkuuden maksimointiin hallitsemalla järjestelmän rajoittavia tekijöitä ja löytämällä tuotannon kapeikot. Toisinaan puhutaan myös synkronoidusta tuotannonohjauksesta. TOC:n keskeinen idea on korostaa sitä, että kaikissa systeemeissä on ainakin yksi rajoitus ja vain yksi pullonkaula, joka rajoittaa loppukädessä kykyä saada parempia tuloksia. TOC korostaa kahta keskeistä asiaa; pullonkaulan

tai kapeikon löytäminen ja huolehtiminen siitä, että tätä pullonkaulaa kuormitetaan, jotta järjestelmä kokonaisuudessaan saavuttaa mahdollisimman hyvän lopputuloksen (Six Sigma -verkkosivu, n.d.). Techt (2015) on määritellyt viisivaiheisen prosessin kapeikkojen poistamiseksi. Vaiheet ovat:

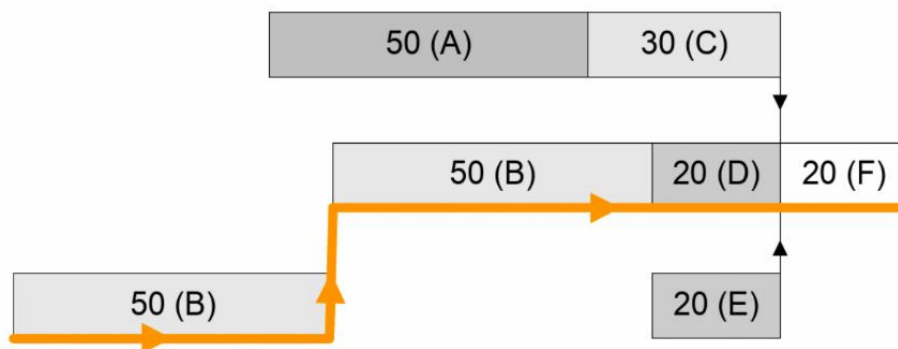
1. Tunnista kapeikko
2. Pidä kapeikko kuormitettuna
3. Mukauta muiden toiminta kapeikkoon
4. Avarra kapeikkoa
5. Aloita alusta

(Techt 2015, s. 310).

Kriittinen polku on ajoitusmenetelmä, jossa projektin toisistaan riippuvat vaiheet asetetaan jonoon ja muodostetaan kriittinen polku. Keskeinen ero muihin perinteisiin ajoitusmalleihin on se, että siinä yksittäiset vaiheet ajastetaan ilman aikapuskuria vaiheiden välillä ja parhaalla suoritusnopeudella kuvan yhdeksän mukaan. Perinteisesti projektinhallinnassa määritetään jokaiselle tehtävälle aikaikkuna, johon on lisätty turvapuskuria tehtäväkohtaisesti kuvan kymmenen mukaan. Kriittisen polun menetelmässä kaikkien vaiheiden turvapuskuri on keskitetty kriittisen polun loppuun, jolloin muodostetaan turva-verkko kaikkia mahdollisia riskejä varten, jotka voivat vaikuttaa määräaikaan pääsemiseen (Techt 2015, s. 112).



Kuva 9. Kriittisen polun ajoitusmenetelmä (Techt, 2015, s. 114)

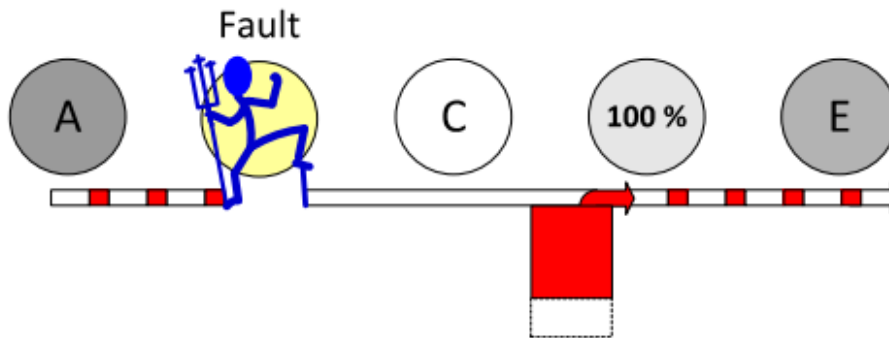


Kuva 10. Perinteinen projektinhallinta (Techt 2015, s. 114)

Kriittisen polun ajoitusmenetelmää käytettäessä on erittäin tärkeää, että projektin lopussa olevaa projektipuskuria ei saa muuttaa minkään projektin osalta. Erityisesti projektien aikaistamiset ovat erittäin pahasta ja uhkaavat koko projektisuunnitelmaa. Kriittistä polkua tulee myös suojata erilaisilla keinoilla, joista tärkeimpiä ovat toimitusketjun puskurit ja työmoraalin ylläpito. Toimitusketjun puskureilla turvataan työn edellytykset. Työmoraalin kannalta on tärkeää soveltaa niin sanottua viestijuoksufilosofiaa, jossa työt aloitetaan välittömästi edellisen vaiheen valmistuttua (Techt 2015, s. 112).

Tuotannossa käytetään perinteisesti kolmenlaista puskuria, joita ovat varasto, aika ja kapasiteetti (Six Sigma -verkkosivu, n.d.). Usein vapaana olevaa resurssia pidetään hukkana erityisesti Lean-ajattelussa. Kuitenkin joissain tapauksissa se on edellytys toimivalle ja kannattavalle liiketoiminnalle. Tämän ajattelun perusteluksi ja tueksi on piirretty alla oleva kuva 11, joka havainnollistaa tätä ajattelutapaa. Kuvassa on viisi resurssia: A, B, C, D, E ja haluamme käyttää resurssia D täydellä kapasiteetilla. Kuvassa oletetaan, että resursseja on käytettävä tietyssä järjestyksessä ja on mahdollista, että jokin resurssi vikaantuu esimerkiksi konerikon tai sairauspoissaolon myötä. Vaiheen D halutaan kuitenkin toimivan 100 % kapasiteetilla, jonka takia juuri ennen D-vaihetta asetetaan tuotantovarasto. Nyt D ei pysähdy, vaikka A-, B- tai C-vaiheessa on ongelmia. Puskurin muodostamiseksi tai vikaantumistilanteen kompensoinniksi vaaditaan aikaisemmilta osastoilta suurempaa

kapasiteettia ja siksi onkin tärkeää, että puskuria muodostavien vaiheiden, tässä tapauksessa vaiheiden A, B ja C kapasiteetti on suurempi kuin puskuroitavan vaiheen D (Techt 2015, s. 42).



Kuva 11. Havainnekuva puskurien hyödyntäminen (Techt, 2015, s. 42)

Priorisointi tarkoittaa asioiden asettamista tärkeysjärjestykseen ja sitä myöten työjonoon. Jonojärjestyksen muodostamiseksi on kehitetty monia prioriteettisääntöjä, joiden avulla voidaan tehdä päätöksiä valintatilanteissa. Priorisointisäännöillä voidaan suunnitella tietyn kuormituspisteen kannalta paras järjestys. Priorisointisääntöjä on helppo pitää kaikkien nähtävillä esimerkiksi tuotannonohjausjärjestelmässä. Vaarana priorisointisäännöissä on kuormituspisteiden osaoptimointi, jolloin kokonaisuus kärsii. On tärkeää valita kokonaisuutta palvelevat priorisointisäännöt ja noudattaa niitä sovitusti (Kouri, 2009, s. 420). Prioriteettisääntöjä Kourin (2009) mukaan ovat:

- Saapumisjärjestys FIFO
- Pienin pelivara (toimitusaika ja vaiheajat)
- Pienin pelivara (vaiheiden lukumäärä)
- Suurin myöhästyminen
- Lyhin työvaihe ensin
- Pisin työvaihe ensin
- Kallein tuote-erä ensin
- Nopeimmin valmistuva ensin
- Aikaisin aloitusajankohta

- Pienin jäljellä olevien vaiheiden lukumäärä
- Suurin jäljellä olevien vaiheiden lukumäärä
- Asetuskustannusten minimointi

2.7 Layout-suunnittelu

Layout-sanalle ei löydy täydellistä suomenkielistä vastinetta, mutta Kouri (2009) kuvaa layoutia seuraavasti:

Layout on vakiintunut termi, jolla tarkoitetaan tuotantojärjestelmän fyysisten osien, kuten koneiden, laitteiden, varastopaikkojen ja kulkureittien sijoittelua tehtaassa. Työnkulun ja tuotantolaitteiden sijoittelun perusteella layoutit voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: tuotantolinja-layoutiin, funktionaaliseen layoutiin ja solu-layoutiin. (s. 475)

Tässä luvussa esitellään erilaiset layout-tyypit ja niihin liittyvät erityispiirteet sekä layout-suunnittelun vaiheet. Teoria auttaa luomaan ymmärryksen siitä, miten layout muodostuu. Layoutin tärkein tehtävä on tukea tuotantoprosessia. Layoutin tärkeitä tavoitteita ovat käsittelyaikojen minimointi, joista erityisesti siirrot ja kuljetusmatkat korostuvat layout-suunnittelussa. Joustavuus layoutissa on tärkeää, jotta tilaa voidaan edelleen järjestää muuttuvissa tilanteissa. Layoutin tulee mahdollistaa tuotannon mahdollisimman sujuva kierto. Laitteinvestoinnit ja lattiapinta-ala on tärkeää hyödyntää taloudellisesti ja tehokkaasti. Työturvallisuuden merkitystä ei myöskään tule unohtaa layoutia suunniteltaessa. Layout-suunnitelman tarkoitus on yksinkertaistaa ja saavuttaa edellä mainittuja tavoitteita. Erityisen tärkeää suunnittelu on silloin, kun perustetaan uutta tuotantotilaa tai laitosta. Kunnollinen suunnittelu auttaa välttämään kalliit uudelleenjärjestelyt. Usein muutostyöt voivat olla niin kalliit, että optimaalinen layout jää kokonaan toteuttamatta (Muther & Hales 2015, s. 15).

Kiinteän paikan layout on layout-tyyppi, jossa materiaali tai komponentti valmistetaan yhdessä kiinteässä paikassa ja vaadittavat toiminnallisuudet löytyvät materiaalin tai tuotteen ympäriltä. Tyypillisesti tuotteet ovat kooltaan isoja ja niitä valmistetaan yksittäin tai vain muutamia kerrallaan (Muther & Hales 2015, s. 42). Kirjallisuudessa tunnetaan myös

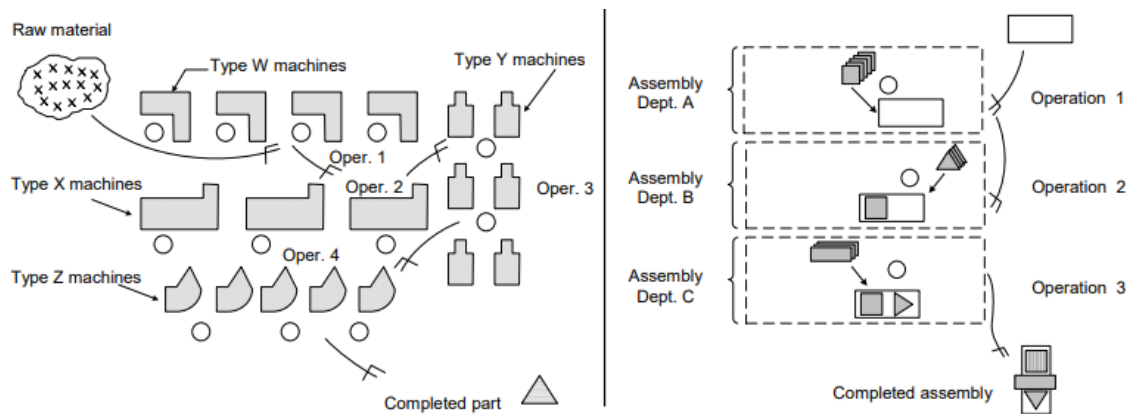
toinen kiinteän paikan layoutia muistuttava layout-tyyppi, funktionaalinen layout, jossa kerätään laajasti erilaisia ja monikäyttöisiä työvälineitä, koneita ja muita resursseja tietylle alueelle. Esimerkiksi sorvit ja hiomakoneet kerätään yhdelle alueelle ja niin edelleen. Näin voidaan helpommin sopeutua isoon vaihteluun tuotannossa ja luoda häiriön kestävyttä tuotantoon. Funktionaalisen layoutin suunnittelu ja toteutus on usein helppo ja kustannustehokas verrattuna muihin layout-tyyppeihin. Haasteina funktionaalisisessa layout-tyypissä nähdään sen heikko tuottavuus. Kuormitusaste jää usein 60–90 % välille. Heikko tuottavuus johtuu pienistä ja vaihtelevista tuotantoeristä, mikä estää tuotannon automatisointia. Töiden ohjaus funktionaalisisessa layoutissa on haastavaa, koska töiden kesto voi vaihdella. Keskeneräisten töiden määrä on suuri ja optimaalisen työjonon muodostaminen on hankalaa (Kouri & muut, 2009, s. 476–477).



Kuva 12. Kiinteän paikan layout (Muther & Hales, 2015, s. 42)

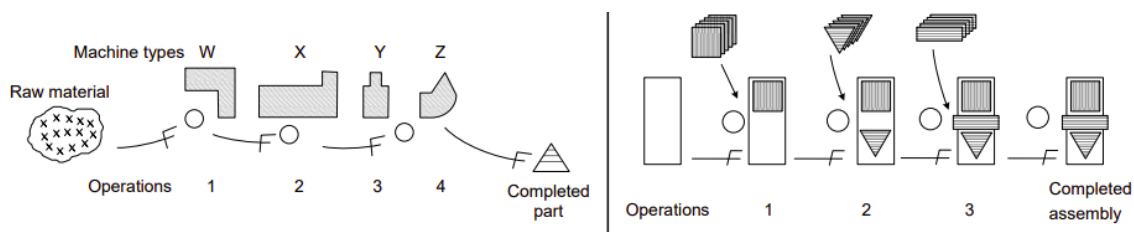
Tarkoitukseen perustuva layout on lähestymistapa, jossa raaka-aine tai tuote siirtyy määrätysti prosessin läpi. Työvälineet, koneet ja muut resurssit on sijoitettu prosessin vaatimaan järjestykseen. Tyypillisesti tuotteet ovat pienempiä ja eräkoot voivat olla suurempia, toisin kuin kiinteän paikan layoutissa. Prosessi sisältää myös yleisesti useampia toisuvia työvaiheita ja isomman laitekannan (Muther & Hales 2015, s. 42). Tarkoitukseen perustuva layout tunnetaan kirjallisuudessa myös nimellä solulayout. Solulayout koostuu erilaisista työvaiheista, joihin on kerätty tarkasti määritetyt työkalut, koneet ja muut resurssit tiettyä vaihetta varten. Tuotteet virtaavat määrätystä järjestyksessä solusta so-

luun. Solulayout on tuottavuudeltaan usein funktionaalista layoutia parempi, koska työvaiheet on jaoteltu tarkemmin, vaihtelu on vähäisempää, solut on suunniteltu räätälöidyn työvaihetta varten ja tuotantovaiheet ovat lähemmäs toisiaan sekä työjonon seuraaminen ja työnohjaus ovat helpompaa. Solulayoutin heikkouksia ovat huono häiriön ja vaihtelun sietokyky. Yksittäisessä solussa ei myöskään pysty suorittamaan siihen kuulumatonta työtä (Kouri & muut, 2009, s. 477–478).



Kuva 13. Tarkoitukseen perustuva layout (Muther & Hales, 2015, s. 42)

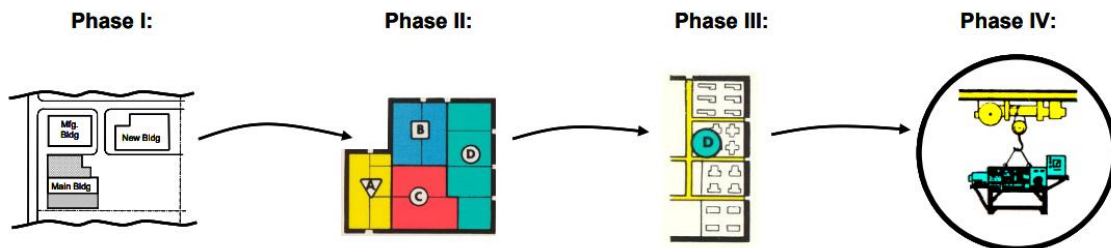
Tuoteaseteltu layout ja tuotantolinja ovat lähestymistapoja, joissa koneet, kokoonpanopisteet tai niiden yhdistelmät ovat järjestetty tuotteen valmistuksen mukaiseen järjestykseen. Peräkkäiset toiminnot suoritetaan välittömästi tuotteen tai raaka-aineen valmistuttua edellisestä vaiheesta (Muther & Hales 2015, s. 42). Pitkälle automatisoitu autotehdas on hyvä esimerkki tuotantolinja-layoutista. Tuotantolinjalle tyypillistä on suuret kappalemäärät ja yksinkertaiset tuotteet. Tuotantolinjalle on yleistä pitkälle viety automaatio ja robottien hyödyntäminen. Tuotantolinjan perustamisella on usein suuremmat perustamiskustannukset, mikä voi vaikeuttaa investointipäätöstä. Toisaalta tuotantolinjan tuottavuus on huomattavan hyvä verrattuna funktionaaliseen layoutiin tai solulayoutiin. Tuotantolinjan kuormitusaste on usein 80–100 %. Tuotantolinjan heikkouksina ovat häiriöt. Lyhytkin pysäytys laskee linjan tuottavuutta nopeasti. Myös investointiriski on suurempi verrattuna toisiin vaihtoehtoihin (Kouri & muut, 2009, s. 475).



Kuva 14. Tuoteaseteltu layout (Muther & Hales, 2015, s. 43)

Layout-suunnittelun peruslähtökohtia ovat tuotteen tai raaka-aineen rakennetiedot, työn vaiheistus ja järjestys, tuotantomäärät ja tekniikat, aikajänne, jolle layout luodaan ja tukitoimintojen, kuten sosiaalityöjen tunteminen. Erilaisia layout-vaihtoehtoja voidaan luoda useampia ja niitä on hyvä arvioida hyötyarvomatriisilla. Arvioitavia piirteitä voivat olla esimerkiksi materiaalin kulun tehokkuus, pinta-alan hyötykäyttö, valmistuksen ohjaus tai joustavuus muutoksille ja laajennuksille (Kouri & muut, 2009, s. 479–482). Layout-suunnittelu voidaan jakaa karkeasti neljään päävaiheeseen. Vaiheessa 1 (sijainti) määritellään alue tai sijainti, johon layout tehdään. Alue voi tarkoittaa uutta tonttia, vapautunutta varastotilaa, tehdaslaajennusta tai muuta käytettävissä olevaa tilaa. Vaiheessa 2 (yleissuunnittelu) muodostetaan lohkokartta, jolla tarkoitetaan aluejakoa tai karkeaa kuvausta siitä, paljonko eri tuotantotilan pääalueet ja materiaalivirrat vaativat tilaa ja muita ominaisuuksia kuten tilan korkeus. Laajoissa layout-kokonaisuuksissa, joissa tontilla on useita rakennuksia ja kerroksia, voidaan vaihetta 2 laajentaa alavaiheisiin 2.A, jossa suunnitellaan alueen rakennusten sijoittelu, 2.B, jossa suunnitellaan jokaisen rakennuksen yleissuunnittelu ja 2.C, jossa suunnitellaan monikerroksisten rakennusten kerroskohtainen layout. Vaiheessa 3 (yksityiskohtainen layout-suunnittelu) layoutiin sijoitetaan yksityiskohtaisesti koneet, laitteet ja muut tehtaan toiminnot kuten materiaalivarastot tai palvelupisteet. Vaiheessa 3 käytetään yksityiskohtien tarkkoja mittoja ja luodaan samalla piirustusta layoutista. Vaiheessa 4 (asennus) haetaan varmistus suunnitelmalle ja luodaan toteutus suunnitelma, jossa määritetään muuton ja siirtojen toteu-

tusta. Todellisuudessa layout-suunnittelun eri vaiheet limittyvät keskenään, koska esimerkiksi yksityiskohtaista suunnitelmaa ilman katon korkeutta tai tilan muotoa tietämättä on mahdoton suorittaa (Muther & Hales, 2015, s. 22).



Kuva 15. Layout-suunnittelun vaiheet (Muther & Hales, 2015, s. 22)

2.8 Simulaation teoria

Simulaatio tarkoittaa järjestelmän mallintamista ohjelmointikielellä tai siihen suunnitellulla tietokoneohjelmistolla. Simulaatio on kokeellinen tekniikka, jota hyödynnetään todellisten järjestelmien mallintamiseen (Stephens, 2019, s. 362–363). Simulaatio voidaan määrittää yksinkertaisesti järjestelmän jäljitelmänä (Robinson, 2014, s. 25). Järjestelmät ovat tyypillisesti monimutkaisia valmistus- tai palvelujärjestelmiä. Simulaatiomalli tuottaa realistisen vasteen oikeasta järjestelmästä (Stephens, 2019, s. 362–363). Järjestelmät voidaan jakaa Robinsonin (2014) mukaan neljään tyyppiin niiden ominaispiirteiden mukaan:

1. Luonnolliset järjestelmät: universumi, sää, galaksit
2. Suunnitellut fyysiset järjestelmät: talo, autot, tuotantolaitokset
3. Suunnitellut abstraktit järjestelmät: matematiikka, kirjallisuus
4. Ihmistoimintajärjestelmät: ihmisen toiminta, perhe, poliittiset järjestelmät

Mallin avulla voidaan luoda todellisia ennusteita, joita voidaan analysoida erilaisin menetelmin. Konkreettisesti hyödynnettäviä simuloitkohteita ovat esimerkiksi henkilöressurssien käyttö ja layoutin tai varaston suunnittelu (Stephens, 2019, s. 362–363). Simu-

lointimallit jaetaan karkeasti kahteen ryhmään; staattisiin, joissa tarkastellaan järjestelmää tietyllä ajanhetkellä tai dynaamisiin, joissa järjestelmää tarkastellaan tietyllä ajanjaksolla (Robinson, 2014, s. 3). Tässä työssä keskitytään dynaamiseen malliin ja tulevat kappaleet on kirjoitettu dynaamisen simuloinnin näkökulmasta. Vielä tarkemmin simulaatiot voidaan jakaa neljään simulaatiotyyppiin, joita ovat Toshevin (2025) mukaan:

- Diskreettitapahtumasimulointi, jossa yksittäiset tapahtumat muuttavat järjestelmän tilaa. Hyödynnetään usein tuotannon ja logistiikan simulaatioissa.
- Monte Carlo -simulointi, jossa käytetään satunnaisotantaa tai -lukuja muodostamaan todennäköisyyteen perustuvia simulaatioita. Hyödynnetään esimerkiksi riskienhallinnassa.
- Jatkuva simulointi, jossa tutkitaan ilmiöitä suhteessa ajankulkuun differentiaaliyhtälöiden avulla. Hyödynnetään erityisesti kemiallisten reaktioiden tutkimiseen prosessiteollisuudessa.
- Agenttipohjainen simulointi, joka perustuu autonomisten agenttien käyttäytymiseen, jotka ovat vuorovaikutuksissa keskenään. Hyödynnetään usein monimutkaisten käyttäytymismallien tutkimiseen. Esimerkiksi sosiaaliset järjestelmät tai liikennejärjestelmät.

2.8.1 Simulaation edut ja haasteet

Tuotantojärjestelmää voidaan analysoida monin eri tavoin esimerkiksi luomalla taulukoita, laskelmia tai optimoimalla toimintaa käytännön kokeilla. Simulaation edut ja haitat onkin tärkeä tuntea, jotta sitä osataan käyttää oikeissa tilanteissa. Simulaation etuja toisiin menetelmiin nähden ovat Robinsonin (2014) mukaan muun muassa:

- Kustannustehokkuus
- Ajansäästö

- Koeolosuhteiden hallinta
- Reaaliaikaisen järjestelmän puute
- Vaihtelun mallintaminen
- Läpinäkyvyys ja vaikuttavuus
- Luovuuden tukeminen
- Ymmärryksen ja tiedon lisääminen
- Viestintä ja yhteisymmärrys

Listatut edut luovat mahdollisuuden säästää aikaa ja rahaa, kun erilaisia vaihtoehtoisia toteutustapoja voidaan testata erilaisilla parametreilla virtuaalisesti nopeasti. Simulointi tarjoaa myös mahdollisuuden tutkia ja mallintaa prosesseja, joita ei ole vielä olemassa. Vaihtelun mallintaminen on erittäin vaikeaa muilla analyysimenetelmillä. Simulointi pakottaa myös tutustumaan järjestelmään ja kehittää järjestelmän ymmärrystä ja läpinäkyvyyttä (Robinson, 2014, s. 32).

Simulointimallit eivät kuitenkaan ole täysin ongelmattomia ja niihin liittyy joitain haasteita. Esimerkiksi kustannukset voivat nousta, sillä simulointiohjelmit ja asiantuntijatyö ovat kalliita erityisesti pienille yrityksille. Mallin luomiseksi vaaditaan myös paljon luotettavaa dataa, jota usein on saatavilla vain rajallisesti. Simulaatiotutkimus vaatii myös paljon aikaa ja asiantuntijuutta ja näiden puute vaikeuttaa mallin luomista. Simulaatio saattaa myös ohjata toimintaa harhaan, jos rajoitteita ja mallia ei ymmärretä tarpeeksi eli mallia kohtaan muodostuu niin sanottu ylikuormitus (Robinson, 2014, s. 33).

2.8.2 Simulaation kulku

Vaihe 1: Tutkimusongelman muodostaminen. Simulaatiotutkimus aloitetaan keräämällä sopiva määrä alan asiantuntijoita aloituskeskusteluun päättämään tutkimuksen yleiset tavoitteet. Simulointiprosessin alussa muodostetaan kuvaus tavoitteista ja määritellään tutkimusongelma. Tavoitteita voivat olla esimerkiksi ongelmakohtien tunnistaminen ny-

kyisessä järjestelmässä tai uuden layoutin tarkastelu. Alussa on tärkeää määrittää tutkimuskysymykset mahdollisimman tarkasti, jotta mallin laajuus ja tarkkuus ovat sopivalla tasolla ja näin ollen vastaavat asetettuja tavoitteita (Law, 2003, s. 67).

Vaihe 2: Datan keräys ja konseptimallin luominen. Simulointimallin kannalta keskeistä on tuntea järjestelmä ja sen toimintaperiaatteet. Kerättävä data riippuu simuloinnin halutusta lopputuloksesta, joka on määritetty vaiheessa yksi. Lisäksi kerättävään dataan vaikuttaa esimerkiksi aikarajoitteet, tietojen saatavuus ja kiinnostavat suorituskykymittaukset. Kerättävää dataa riippuen tutkimuksesta voi olla esimerkiksi vaiheajoja, parametreja, datayhteyksiä tai todennäköisyysjakaumia. Konseptuaalisella mallilla tarkoitetaan alustavaa kuvausta järjestelmästä ja sen käyttämisestä. Konseptuaalisen mallin validiteetti on tärkeää vahvistaa ennen siirtymistä eteenpäin (Law, 2003, s. 67).

Vaihe 3: Konseptimallin arviointi ja hyväksyntä. Vaiheen kaksi valmistuttua esitellään konseptimalli alan asiantuntijaryhmälle ja muille keskeisille sidosryhmille. Se käydään läpi yksityiskohtaisesti, jotta mahdolliset virheet löytyvät. Mikäli mallista löytyy korjattavaa, palataan vaiheeseen kaksi. On hyvin yleistä, että konseptuaalisen mallin validointi vaatii useamman kierroksen varsinkin tilanteissa, joissa suunnitellaan uutta järjestelmää. Mallista ei kannata myöskään tehdä liian tarkkaa sillä liiallinen yksityiskohtaisuus ei palvele tutkimusta. Tällöin yhdessä alan asiantuntijoiden kanssa sovitaan joustoista tietyissä tilanteissa (Law, 2003, s. 67).

Vaihe 4: Mallin ohjelmointi suoritetaan tietokoneohjelmalla. Ohjelma valitaan tavoitteiden ja luotavan mallin perusteella. On tärkeää, että tietokoneohjelmaa valittaessa konseptuaalinen suunnitelma on luotuna, jotta osataan valita oikea ohjelmisto (Law, 2003, s. 68).

Vaihe 5: Tietokonemallin arviointi ja hyväksyntä. Vaiheen viisi tärkein tehtävä on varmistaa, että simulaatiomalli kuvastaa järjestelmää riittävän realistisesti ja tuottaa luotettavia

tuloksia päätöksenteon tueksi. Keinoja arvioida mallin validiteettia ovat tulosten analysointi yhdessä alan asiantuntijoiden kanssa sekä herkkyysanalyysi. Analysointivaiheessa mallia voidaan verrata olemassa olevaan järjestelmään ja sen tuottamiin tuloksiin. Herkkyysanalyysissä järjestelmän keskeisiä arvoja muunnellaan ja niiden vaikutusta arvioidaan (Law, 2003, s. 68).

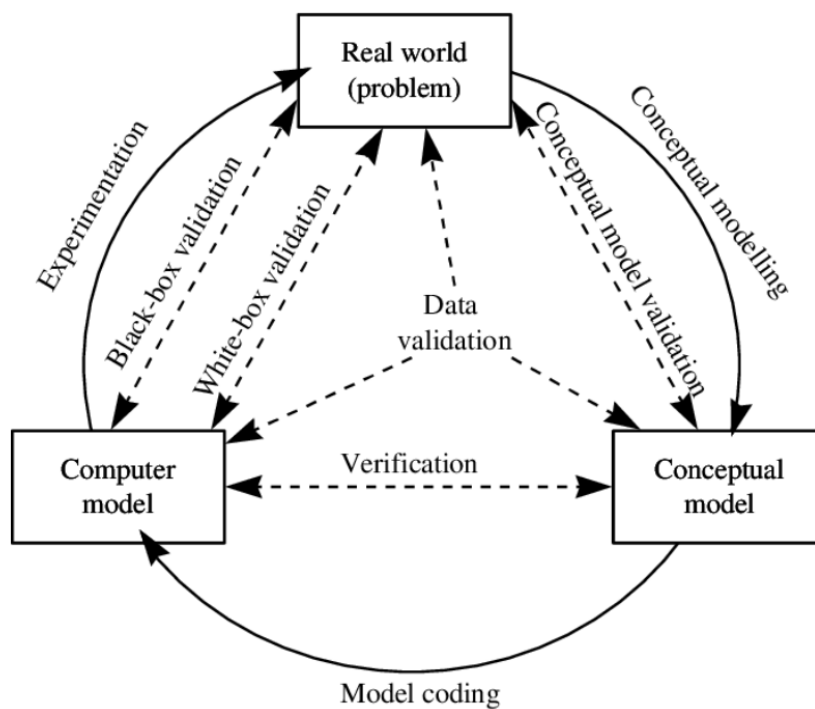
Vaihe 6: Simulointitutkimuksen suunnittelu, toteutus ja tulosten analysointi. Tutkimuksen suunnitteluvaiheessa päätetään esimerkiksi järjestelmän simuloivat kohdat, skenaariot ja aikajakson pituus. Tulokset analysoidaan ja tarvittaessa simulaatiota toistetaan (Law, 2003, s. 68).

Vaihe 7: Dokumentointi ja tulosten esitys. Simulointitutkimus on tärkeää dokumentoida mahdollisimman yksityiskohtaisesti erityisesti, mikäli simulaatiomallia on tarkoitus käyttää tulevaisuudessa uudelleen. Dokumentaatiosta tulee selvittää esimerkiksi kuvaus ohjelmistosta ja asiakirja käytetyistä arvoista ja parametreista sekä perusteet tehdyille valinnoille. Lopuksi simulaatiotutkimus esitellään kohdeyleisölle (Law, 2003, s. 68).

2.8.3 Simulaatiomallin verifiointi ja validointi

Verifiointin tarkoitus on varmistaa, että konseptuaalinen malli on oikein muunnettu tietokonemalliksi. Verifiointivaihetta voidaan helpottaa suorittamalla iteraatiokierroksia tietokonemallin ohjelmointivaiheessa. Validoinnin tarkoitus on varmistaa, että rakennettu malli on riittävän kuvaava kyseiseen käyttötarkoitukseensa. Validointi on binäärinen päätös, kyllä tai ei, ja se perustuu käyttäjien kokemukseen siitä, onko malli riittävän tarkka käyttötarkoitukseensa. On tärkeää, että käyttötarkoitus on määritetty tarkkaan. Verifiointi on tarkemmin määriteltävissä esimerkiksi prosentissa, miten hyvin tietokone-malli vastaa konseptimallia. Verifiointia voidaan ajatella myös validiteetin osamuodostajana. Koska konseptimalli ja tietokonemallit ovat yksinkertaistettuja, niiden ei tarvitse olla tarkkoja, vaan tärkeintä on, että ne ovat tarkoitukseen soveltuvia (Robinson, 2014, s. 234–235). Kuva 16 havainnollistaa miten simuloinnin luottamus luodaan verifikaation ja

validiteetin avulla. Verifiointi tarkoitti konseptuaalisen mallin ja tietokonemallin välistä vastaavuutta. Tätä ennen tulee varmistaa, että konseptuaalinen malli kuvastaa reaali- maailmaa riittävällä tarkkuudella ja on validi. Datan tarkkuus ja validiteetti on myös keskeistä. Termillä white-box validation viitataan siihen, vastaako tietokonemallin osat reaalimaailman elementtejä riittävällä tarkkuudella. Black-box viittaa taas korkeamman tason yleistarkastukseen ja vastaa siihen, onko kokonaismalli riittävän hyvä saavuttaakseen käyttötarkoituksensa (Robinson, 2011).



Kuva 16. Simulointimallin verifiointi ja validointi (Robinson, 2011)

2.9 Kirjallisuuskatsauksen yhteenveto

Muuntajavalmistuksen perusteet-kappaleessa käytettyä tietoa hyödynnettiin konseptimallin rakentamiseen. Engineering-to-order (ETO)-kappale puolestaan kuvaa muuntajatehtaan toimintaympäristöä ja sen haasteita. Yhdessä nämä kappaleet tarjoavat tutkijalle ja tutkimuksen lukijalle ymmärryksen muuntajateollisuudesta ja Hitachi Energy Oy:n

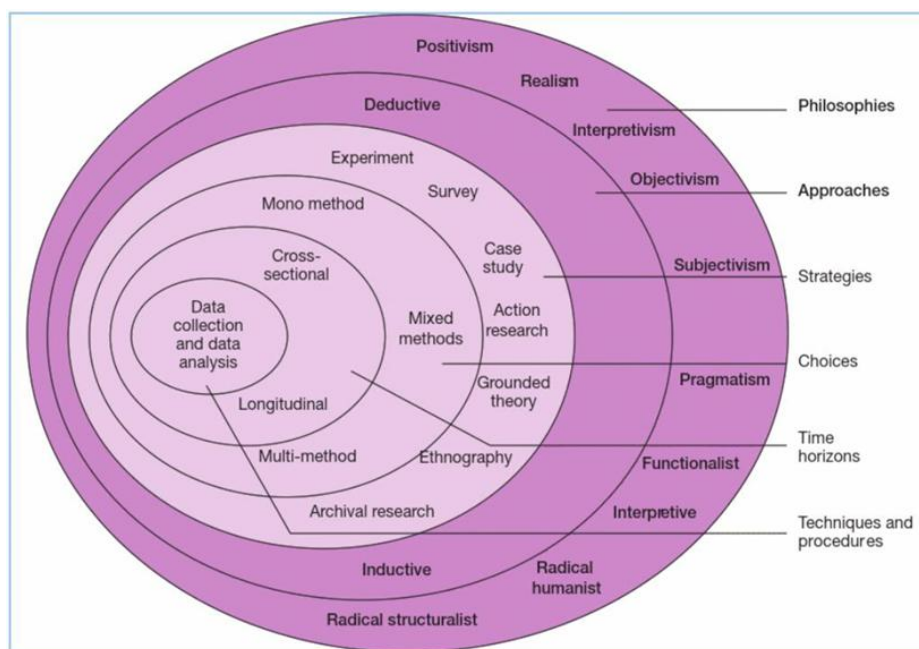
toiminnasta. Kirjallisuuskatsauksessa tutkittiin teollisuuden kaavoja ja mittauskohteita sekä käytiin yleisesti läpi matemaattiset ja tilastolliset käsitteet. Tämä helpotti simulaatiotutkimuksen raportin tulkintaa ja laadintaa. Lean- ja Six Sigma-filosofioita tutkittiin kirjallisuuskatsauksen muodossa, sillä useita Lean-ajattelusta tuttuja teorioita hyödynnettiin uuden tehtaan konseptia rakentaessa: esimerkiksi CONWIP ja imuohjaus. Six Sigman DMADV-menetelmä sopii monin osin yhteen simulaatiotutkimuksen kanssa ja menetelmää soveltaen saatiin tutkimuksen alussa kerättyä oikeanlaista dataa ja luotua käsitys tutkimuksen tärkeistä tavoitteista. Vaihtelunhallintaan tutustuttiin kirjallisuuskatsauksessa Hitachi Energy Oy:n toiveiden mukaan TOC- ja CPM-teorioiden sekä puskurivarastojen hyödyntämisen näkökulmista, jotka auttoivat luomaan oikeanlaisen simulaatiomallin, osittain rakentamalla uuden tehtaan konseptia suoraan teorioiden mukaiseksi ja toisaalta niin, että simulaatiomallin avulla voidaan testata teorioiden paikkansa pitävyyttä. Layout ja tuotantojärjestelmä ovat hyvin sidoksissa toisiinsa, ja sen kautta myös simulaatiotutkimus oli hyvin sidoksissa tehtaan layout-suunnitteluun. Kirjallisuuskatsauksen mukaan voitiin päätellä, että tutkimuksen aikaan tehtaan layout-suunnittelu oli vaiheissa kaksi ja kolme. Simulaatiotutkimuksen tulokset tulevat tukemaan vaihetta kolme ja neljä erinomaisesti ja antavat perusteluita simulaatiotutkimukselle. Simulointikappaleessa käydään läpi simulaation edut ja hyödyt sekä simulaatiotutkimuksen kulku. Simulaatiotutkimuksen toteutusta on kuvattu tässä diplomityössä kappaleessa 2.8.2. seitsemänportaisen menetelmän mukaan. Tutkimuksen käytännön kulkua on kuvattu lisäksi kappaleissa kolme ja viisi.

3 Metodologia

Tässä luvussa käydään läpi tässä tutkimuksen käytetyt metodologiat sekä perustellaan, miksi valittuihin metodologioihin on päädytty ja miten niitä on sovellettu tutkimuksessa. Tietokonesimulaatio on erityinen tutkimusmenetelmä ja lähestymistapa pureutua tutkittavaan aiheeseen monitasoisesti. Kappaleessa esitellään tutkimusprosessia käyttäen apuna Saundersin ja muiden (2007) kehittämää tutkimussipulia, jotta metodologiasta ja tutkimusprosessista saisi syvällisemmän ymmärryksen.

3.1 Tutkimussipuli

Tutkimussipuli auttaa tutkijaa käymään järjestelmällisesti ja loogisesti läpi, miten tutkija aikoo käsitellä aihetta ja tutkimuskohdetta tai toisin sanoen miten tutkija aikoo vastata tutkimuskysymyksiin ja testata hypoteeseja. Saundersin ja muiden (2007) kehittämä tutkimussipuli on yleisesti käytetty menetelmä tutkimuksen metodologian määrittämiseen. Sipuli koostuu kuudesta kerroksesta, joita ovat tutkimusfilosofia, tutkimuksen lähestymistapa, tutkimusstrategia, tutkimusmenetelmän valinta, tarkastelujakso, aineiston keruu ja analyysi (Saunders ja muut, 2007).



Kuva 17. Tutkimussipuli (Saunders ja muut, 2007)**3.1.1 Tutkimusfilosofia**

Tutkimusfilosofia on kytköksissä tiedon jalostamiseen ja sen luonteeseen. Tutkimusfilosofian määrittelyssä tärkeää on hahmottaa tiedon keruun ja muodostumisen välinen suhde. Tutkimusfilosofiat voidaan jakaa kolmeen päähaaraan: epistemologia, ontologia ja aksiologia. Pragmatismissa, joka kuuluu epistemologisiin filosofioihin, tutkimuskysymysten merkitys on suuri. Pragmatistitutkijat ovat orientoituja tarkastelemaan kysymyksiä kuten mitä ja kuinka, kun he tarkastelevat tutkimusongelmaa. Pragmatismi on myös sopiva filosofia silloin, kun tutkimusfilosofiassa on sekä positivismista että funktionaalista lähestymistä, mutta tutkimusta ei voida luokitella täysin kumpaankaan (Wilson 2014, s. 33–34).

Tämän tutkimuksen tutkimusfilosofia on pragmatismi. Tutkimuksen keskeinen tulos on rakennettu simulaatiomalli, jota voidaan käyttää tuotantojärjestelmän käytännön kehittämiseen ja parannuskohteiden etsimiseen. Tutkimuksessa etsittävät parannuskohteet liittyvät tehtaan suorituskyvyn parantamiseen esimerkiksi etsimällä tuotannon pullonkauloja sekä tutkimalla vaihtelunhallintakeinojen vaikutusta simulaation avulla. Simulaatiomallin eri skenaarioissa voidaan vertailla tehtaan suorituskykyä ja löytää pullonkauloja käyttöastetta ja output-arvoja seuraamalla. Vaihtelunhallintaa voitiin tutkia vaihtamalla simulaation parametreja, kuten puskurivarastojen kokoa tai häiriöastetta, ja analysoimalla niiden vaikutusta.

3.1.2 Tutkimuksen lähestymistapa

Tutkimusta voidaan lähestyä kahdella eri lähestymistavalla, joita ovat deduktiivinen ja induktiivinen lähestymistapa (Saunders ja muut, 2007). Deduktiivisen tutkimuksen läh-

tökohtana on jokin teoria tai hypoteesi, jota pyritään testaamaan ja analysoimaan. Tutkimuksessa luodaan tyypillisesti hypoteeseja ja kerätään aineistoja olemassa olevan teorian ympärille, jonka perusteella analysoidaan hypoteesin paikkansapitävyyttä. Induktiivisen tutkimuksen lähtökohtana on luoda teoria tai hypoteesi. Tutkimusmenetelmänä tätä käytetään, kun aiheesta ei vielä tiedetä paljoa. Induktiivisen menetelmän tavoitteena on kehittää aineistoon pohjautuva teoria ja pyrkiä selittämään aineistossa esiintyviä kuvioita ja suhteita (Salomäo, 2023).

Tässä tutkimuksessa on käytetty induktiivista lähestymistapaa, sillä tutkimus hyödynsi Hitachi Energy Oy:ltä saatuja lähtötietoja ja rajoitteita simulaatiomallin perustana. Simulaatiomalli toimii tutkimuksessa keinona tuottaa uutta teoreettista ymmärrystä. Tutkimuksessa luotiin uutta dataa ja tietoa sekä konsepti vielä rakentamattomasta uudesta tuotantojärjestelmästä. Uutta tuotantojärjestelmää testattiin simulaatio-ohjelmistolla ja luotiin hypoteeseja sen toiminnasta eri tilanteissa. Tulokset pyrkivät selittämään sitä, mitkä tekijät vaikuttavat tuotantojärjestelmän suorituskykyyn ja vaihteluun.

3.1.3 Tutkimusstrategia

Tutkimusstrategia määräytyy enimmäkseen tutkimuskysymysten ja tutkimuksen tavoitteiden perusteella. Erilaisia tutkimusstrategioita on useita, joista yleisimmät ovat kyselytutkimus, koeasetelma, tapaustutkimus, toimintatutkimus, grounded theory, etnografia ja arkistotutkimus (Saunders ja muut, 2007). Tapaustutkimuksessa kohteena on yleensä jokin organisaatio, kuten työpaikka, yritys tai oppilaitos tai jokin prosessi. Tapaustutkimuksessa pyritään saamaan mahdollisimman monipuolinen kuva tarkasteltavasta kohteesta tai ilmiöstä tutustumalla siihen kokonaisvaltaisesti (Vuori, n.d.). Koeasetelman tarkoituksena on selvittää, miten riippumattomassa muuttujassa tehty muutos vaikuttaa toiseen, riippuvaiseen muuttujaan. Perinteisesti kokeellisessa tutkimuksessa on koeryhmä ja kontrolliryhmä (Wilson 2014, s. 55).

Tämän tutkimuksen strategiana toimii yhdistelmä tapaustutkimusta ja koeasetelmaa. Tutkimuksessa projekti on toteutettu Hitachi Energy Oy:lle ja keskeisenä osana sitä yrityksen käyttöön on rakennettu simulaatiomalli tuotantojärjestelmästä. Tämä antaa perusteet tapaustutkimuksen valintaan. Tutkimus aloitettiin keräämällä keskeiset asiantuntijat koolle, tässä tapauksessa tuotannon kuormituksesta ja kehityksestä vastaavia henkilöitä, joiden kanssa tehtaan konseptia alettiin rakentamaan. Vapaamuotoisia haastatteluja uuden tehtaan suunnitteluorganisaation sekä työnjohdon kanssa pidettiin aina tarpeen vaatiessa. Toisaalta koska itse simulaatiomalli on rakennettu nimenomaan yhdessä yrityksen ja ulkopuolisten toimijoiden kanssa, joiden vuorovaikutus on vaikuttanut mallin rakentamiseen luoden paremman lopputuloksen, on perusteltua pitää tutkimusta osittain koeasetelmana. Rakennettu konsepti ei ollut heti oikeanlainen, vaan sitä kehitettiin ja parannettiin jatkuvana prosessina tutkimuksen läpi. Simulaatioajoissa tuloksia vertailtiin toisiinsa eri skenaarioiden avulla. Skenaarioista valittiin yksi vertailukohde, jota voidaan ajatella koeasetelman kontrolliryhmänä, jota vasten erilaisia parametreja vaihtamalla luotiin koeryhmiä. Vaihdeettavia parametreja olivat työvaiheiden kapasiteetti, puskurivarastojen koko, häiriöiden määrä, vaiheajat, ennusteiden toteumakerroin sekä työjonon painotukset. Simulaatiomalliin annettavat parametrit olivat taulukon yksimukaisia, mutta suuri osa parametreista määritettiin suoraan työjonoon taulukon kaksi muukaan. Työjonoon asetettiin allekkain töitä, joille annettiin jokaisen työvaiheen tarvitsemat parametrit. Parametrejä olivat työn kesto tunneissa ja vuorokausissa tai työnkulkua ohjaava arvo, esimerkiksi 0 tai 1 joka määrittä, otetaanko työ tietylle vaiheelle vai ei.

Input parametrit							
Yleiset	yksikkö	Puskurivarastot	yksikkö	Kapasiteetit L1	yksikkö	Kapasiteetit L2	yksikkö
Simulaation pituus	pv	Puskuri1 L1	kpl	Vaihe1.1 L1	x h/vrk	Vaihe1.1 L2	x h/vrk
Koeistusvirheet	%	Puskuri2 L1	kpl	Vaihe1.2 L1	x h/vrk	Vaihe1.2 L2	x h/vrk
Kiristelyvirheet	%	Puskuri3 L1	kpl	Vaihe2 L1	kpl /vrk	Vaihe2 L2	kpl /vrk
Ennakkohuolto laite1	pvm	Puskuri4 L1	kpl	Vaihe3 L1	pv /vk	Vaihe3 L2	pv /vk
Ennakkohuolto laite2	pvm	Puskuri1 L2	kpl	Vaihe4 L1	x h/vrk	Vaihe4 L2	x h/vrk
Ennakkohuolto laite3	pvm	Puskuri2 L2	kpl	Vaihe5 L1	pv /vk	Vaihe5 L2	pv /vk
Ennakkohuolto laite4	pvm	Puskuri3 L2	kpl				
		Puskuri4 L2	kpl				

Taulukko 1. Simulaatioparametrit esimerkkitaulukko

Parametri1	Parametri2	Parametri3	Parametri4	Parametri5	Parametri6
Muuntajan tuoteperhe	vaihe 1.1	vaihe 1.2	vaihe2	vaihe3	vaihe5
Reactor	x	x	x	x	x
Reactor	x	x	x	x	x
Industrial	x	x	x	x	x
SPT	x	x	x	x	x
SPT	x	x	x	x	x
SPT	x	x	x	x	x
SPT	x	x	x	x	x
Reactor	x	x	x	x	x
SPT	x	x	x	x	x
Industrial	x	x	x	x	x

Taulukko 2. Työjonoparametrit esimerkkitaulukko

3.1.4 Tutkimusmenetelmän valinta

Tutkimus voi olla yksi-, seka- tai monimenetelmätutkimus. Tutkimuksessa käytettävä tieto ja sen hankkimismenetelmät vaikuttavat siihen, mikä näistä valitaan (Saunders ja muut, 2007). Tässä työssä simulaatiomalliin syötettävän työjonon pohjana käytettiin aineistoa erityisesti liittyen työaikoihin ja työsuoritteeseen, taulukon kaksi mukaan. Tällaiset tiedot ovat kvantitatiivisia eli määrällisiä tietoja. Kuitenkin itse mallin rakennus on toteutettu hyödyntämällä kvalitatiivisia eli laadullisia menetelmiä, joita ovat mielipiteiden ja näkemysten keräys koskien simulaatiomallia ja tuotantojärjestelmää. Sekamenetelmät viittaavat tutkimukseen, jossa on käytetty sekä kvalitatiivista että kvantitatiivista tiedonkeräystä (Saunders ja muut, 2007). Siksi tässä tutkimuksessa käytetty menetelmä on sekamenetelmä. Tämä toimii hyvin valitun tutkimusfilosofian kanssa, koska pragmatismia pidetään yleensä sopivimpana ja suosituimpana paradigmana sekamenetelmille (Wilson 2014, s. 301). Kvantitatiivista tietoa kerättiin tässä tutkimuksessa tuntienseurantajärjestelmistä ja arkistoiduista aikaisemmista tutkimuksista. Esimerkiksi toteutuneet työtunnit projektien eri vaiheille saatiin selville tätä kautta. Kvantitatiivista kyselytutkimusta tehtiin, jotta työvaiheiden erilaiset toimintatavat ja priorisointisäännöt saatiin selville, jolloin voitiin rakentaa prosessikaavio ja konseptimalli.

3.1.5 Tarkastelujakso

Tutkimukset jaetaan karkeasti kahteen eri pääluokkaan tarkastelujakson mukaan, joita ovat poikkileikkaus- ja pitkittäissuuntainen (Saunders ja muut, 2007). Poikkileikkaussuuntaisessa tutkittava aikaväli perustuu tietyistä ajankohdasta kerättyyn dataan tai tutkimus kuvastaa rajattua aikaväliä. Pitkittäissuuntainen tutkimus perustuu tyypillisten vuosien aineistoon ja on jatkuvaa (Wilson 2014, s. 141). Tämän tutkimuksen tarkoitus on kuvastaa tuotantojärjestelmää tietyissä aikarajoissa ja tietyillä hetkillä. Simulaatiomalli on luotu tiettyä hanketta varten ja on staattinen. Tästä syystä tutkimus on luonteeltaan poikkileikkaussuuntainen. Simulaatiolla haluttiin simuloida vuoden mittaista ajanjaksoa, jonka katsottiin kuvastavan tehtaan toimintaa riittävästi. Toisaalta mallia on tarkoitus pystyä hyödyntämään eri aikavälien ja skenaarioiden mallintamiseen pitkälle tulevaisuuteen. Lisäksi malli on myös kehitettävissä ja tutkimus jatkettavissa. Simulaation pituutta voi vaihtaa ja voidaan luoda erilaisia tilanteita muokkaamalla työjonossa tuotteiden järjestystä tai tuoteperheiden painotusta. Nämä antavat tutkimukselle myös perusteita pitää sitä osittain pitkittäissuuntaisena.

3.1.6 Aineistonkeruu ja analyysi

Tutkimuksessa käytettyä dataa luokitellaan primaariseen eli ensisijaiseen ja sekundaariseen eli toissijaiseen suhteessa datan alkuperään (Saunders ja muut, 2007). Ensisijaista tutkimusaineistoa kerätään suoraan alkuperäisistä lähteistä ja sitä käytetään ja analysoidaan tutkimustavoitteiden saavuttamiseksi ja tulosten tuottamiseksi. Dataa kerätään erityisesti tutkimuskysymyksen ohjaamana ja tiedonkeruuprosessi on hyvin tutkijan hallittavissa. Toissijaista tutkimusdataa ei erikseen kerätä tiettyä tutkimusta varten, vaan se on olemassa olevaa ja helposti saatavilla olevaa tietoa. Tällaista dataa saadaan esimerkiksi julkaistuista tutkimuksista, kirjoista, verkkolähteistä tai arkistoista (Salomäo, 2023).

Tämän tutkimuksen datasta suurin osa oli toissijaista, sillä Hitachi Energy Oy:llä oli paljon valmista tiedonkeruuta taustalla, jota hyödynnettiin tutkimuksessa. Kirjallisuuskatsaus

on myös toissijaista tiedonkeruuta. Toisaalta tiedonkeruuta jatkettiin vielä tutkimuksen aikana, sillä kyseinen työ vaati uusia tietoja, kuten tehtaan uudet hankinnat, kapasiteetit ja erityisesti uusien tuoteperheiden tiedot täytyi selvittää. Tämä tieto on ensisijaista ja kerätty kyselytutkimuksena. Tutkimukseen saatuja ja kerättyjä tietoja olivat tuotteiden vaihdeajat, vaiheiden läpimenoajat, työvaiheiden kapasiteetit, läpimenoajat, vaiheissa tapahtuvien virheiden määrä, tuotantopysäytysten määrä sekä kertoimet tuotannon ennusteiden toteutumisesta, jotka kerättiin tuotteiden parametreiksi. Aineistot kerättiin tutkimalla vuosien 2021–2022 toteutuneita lukuja. Tämä onnistui, koska Hitachi Energy Oy:llä on pitkä historia projektikohtaisesta ja vaiheittaisesta tuntienseurannasta. Kerättyä dataa hyödynnettiin, kun työssä luotiin työjonoa simulaatiomallille. Työjonoa luotiin käyttämällä oikeaa tilauskantaa ja oikeita tuotteita, määrittämällä niille ennusteparametrit vuosien 2021 ja 2022 dataan perustuen aiemmin esitellyn taulukon kaksi mukaisesti. Datan validiteettia varmistettiin tarkistamalla sitä läpi useaan kertaan ja useiden eri henkilöiden toimesta.

4 FlexSim-simulaatio- ja analyysiohjelmisto

Tässä luvussa esitellään simulaatio-ohjelmisto FlexSim 25.1.3, jota käytetään tässä diplomityössä tehdassimulaation rakentamiseksi. Luvussa esitellään sovelluksen ominaisuuksia yleisesti ja perusteita FlexSimin valintaan, jonka jälkeen käydään tarkemmin läpi käyttöliittymä, logiikan rakennus ja lopuksi datan tulostus ja analysointia FlexSimissä.

4.1 FlexSim-ominaisuudet

FlexSim-sovelluksessa simulointi on keskittynyt erityisesti toimintajärjestelmiin, joissa niin sanotut panokset muutetaan tuotoksi toisiinsa liittyvien toimintojen ja prosessien kautta. Toiminnot ja prosessit vaativat erilaisia resursseja, esimerkiksi laitteita, materiaaleja tai henkilöitä. Toimintajärjestelmän simulointi vaatii erityistä tarkkuutta kolmesta näkökulmasta, joita ovat vuorovaikutus, vaihtelu ja dynamiikka, koska ne ovat luontaisia toimintajärjestelmille. Järjestelmän eri osat ja resurssit liittyvät toisiinsa erilaisin monimutkaisin tavoin ja jopa yksinkertaisetkin järjestelmät sisältävät vaihtelua, vuorovaikutusta ja erilaisia dynamiikoita (Greenwood, 2025). Toimintajärjestelmää voidaan mallintaa ja analysoida neljällä perustyyppisellä simulointimenetelmällä:

- Diskreettitapahtumasimulointi (DES)
- Monte Carlo -simulointi
- Jatkuva simulointi
- Agenttipohjainen simulointi

FlexSim tukee kaikkia simulointimenetelmiä, mutta sen pääpaino ja vahvuudet ovat diskreettitapahtumasimuloinnissa. DES:ssä järjestelmän tila muuttuu erillisten tapahtumien seurauksena tietyissä ajanhetkissä. FlexSim on nykyaikainen ja kattava simulaatiomallinnuksen analyysiympäristö, joka tukee teollisuuden päätöksentekoa sekä akateemista tutkimusta. Ohjelmisto on helppokäyttöinen ja tukee mallien asteittain rakennusta, jossa luodaan ensin yksinkertainen versio ja lisätään monimutkaisuutta asteittain (Greenwood, 2025). Tämän vuoksi FlexSim soveltuu siis erinomaisesti tämän tutkimuksen simulaatiomallin rakentamiseen.

FlexSimin tärkeimmät ominaisuudet ovat Delfoi Consultingin (n.d.) mukaan:

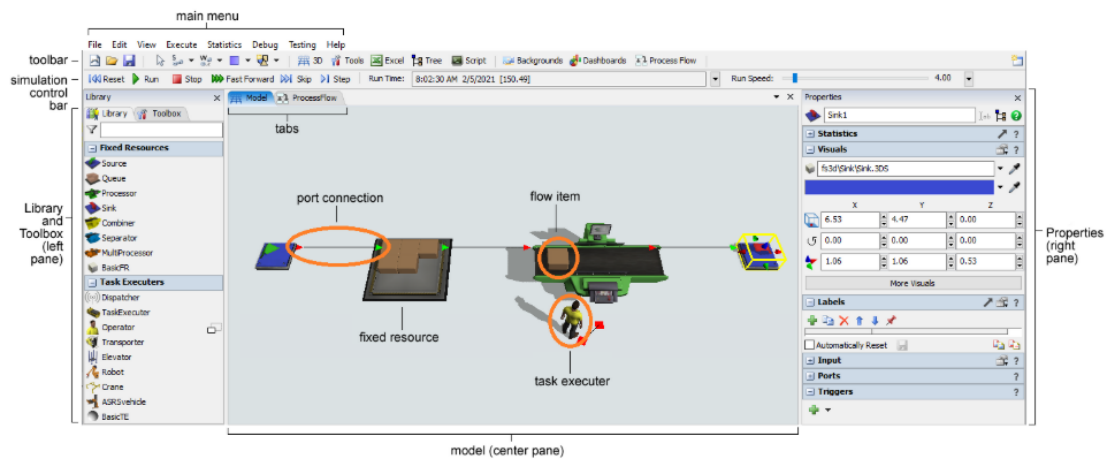
- Mahdollistaa kaikkien kuviteltavissa olevien järjestelmien ja vaihtoehtojen mallintamisen vaaditulla tarkkuudella.
- Ohjelmisto käyttää tietokoneen muistia ja prosessoria tehokkaasti, pitäen sovelluksen nopeana.
- Mahdollistaa olemassa olevien 2D- ja 3D-tiedostojen hyödyntämisen.
- Kattavat ja toimivat visualisointiominaisuudet, joilla päästään tarpeen vaatiessa pelitasolle ja voidaan rakentaa sisään astuttava virtuaaliversio.
- Laaja maailmanlaajuinen käyttäjäkunta.
- Ohjelmisto ymmärtää kaikkia yleisimpiä taulukko- ja tietokantaformaatteja.

FlexSimin edistyneet ominaisuudet ovat Delfoi Consultingin (n.d.) mukaan:

- Avoin arkkitehtuuri ja integrointi C++ ohjelmointikieleen
- Oma sisäinen FlexScript-ohjelmistokieli
- ProcessFlow vuokaavio-ohjelmointi, joka mahdollistaa yksinkertaisten mallien ohjelmoinnin ilman ohjelmointikielten osaamista.
- Mallin kehittäjille tarjolla erikoisnäkyymiä mm. 2D ja 3D sekä hierarkiapuunäkymään.
- Itsediagnostiikka koodin tehokkuuden arviointiin.

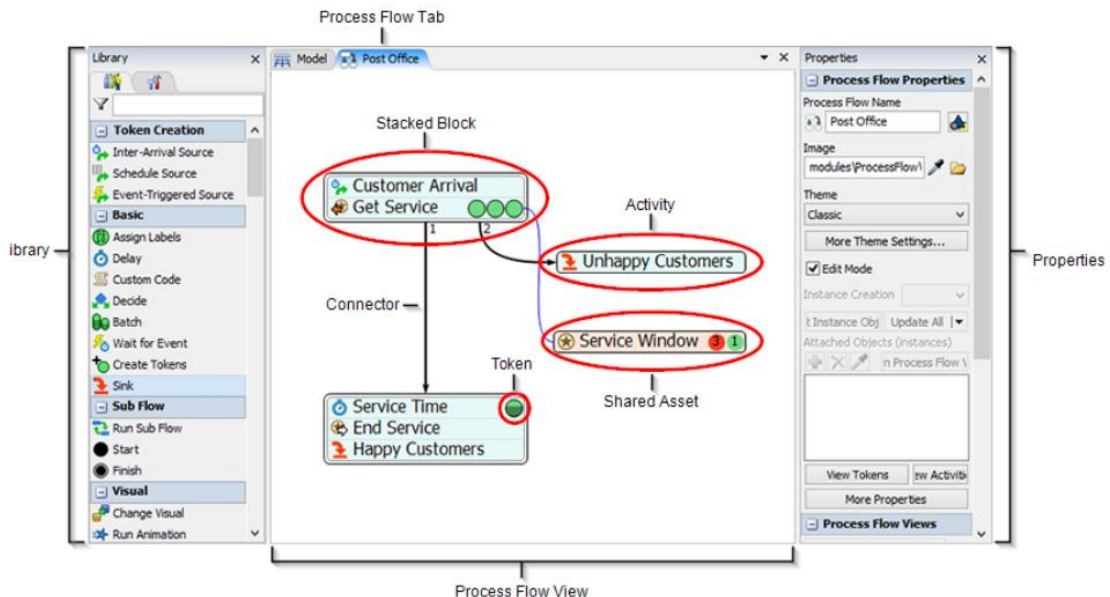
4.2 FlexSim-käyttöliittymä

FlexSim-ohjelmistossa simulointimallia rakennetaan kahdessa keskeisessä näkymässä: 3D Model ja Process Flow Tool eli 3D-malli sekä prosessinvirtaustyökalu, jotka ovat kytköksissä toisiinsa. Kuvat 18 ja 19 havainnollistavat näkymiä. Prosessivirtaustyökalussa rakennetaan mallin logiikka, jota voidaan upottaa visuaaliseen 3D-malliin ja sen rakennuspalikoihin. 3D-malli on sovelluksen pääasiallinen työtila, jonne voidaan rakentaa mallia vetämällä sinne erilaisia objekteja. Simulaatiota ajaessa 3D-mallissa voi seurata objektien toimintaa ja liikkeitä (FlexSim Software Products Oy, 2025).



Kuva 18. 3D-malli (FlexSim Software Products Oy, 2025)

Tässä diplomityössä suurin osa työstä tehtiin prosessinvirtaustyökalussa, koska tutkimus oli erittäin aineistopainotteinen ja halutut lopputulokset ovat numeerisia arvoja, jolloin työn visuaalisuuden rooli jäi pienemmäksi. 3D-mallia hyödynnettiin työssä yksinkertaisesti esimerkiksi värikoodeilla ja yksinkertaisilla objekteilla, kuten kuutioilla tai sylintereillä, jotka helpottivat virtauksen hahmottamista.



Kuva 19. Prosessinvirtaustyökalu (FlexSim Software Products Oy, 2025)

Prosessivirta rakennetaan erilaisten objektien ja työkalujen avulla, jotka ovat mallin perusrakennuspalikoita. Erilaisia objekteja on rakennettu erilaisiin käyttötarkoituksiin ja toimintoihin. Simulaatiomallissa yleisimmät objektit ovat:

- Flow items eli virtaavat esineet, joita ovat esimerkiksi asiakkaat, osat, tuotteet tai mikä tahansa muu, joka liikkuu tai virtaa simulointimallin läpi.
- Fixed resources eli kiinteät resurssit, joilla tarkoitetaan paikallaan pysyviä palikoita, jotka suorittavat niille annettuja toimintoja. Esimerkiksi lähde luo virtauskohteita ja jono tallentaa virtausta.
- Task executors eli tehtävän suorittajat voivat liikkua mallissa ja suorittaa niille annettuja tehtäviä, kuten kuljettaa virtauselementtejä kiinteiden resurssien välillä, esimerkiksi työntekijä, joka kuljettaa tuotteen paikasta A paikkaan B.

(FlexSim Software Products Oy, 2025).

Library ja Toolbox eli kirjasto ja työkalupakki, kuvassa 18 vasemmassa reunassa, sisältävät erilaisia objekteja, joita voi käyttää 3D-mallin tai prosessivirran rakentamiseen. Objektien sisään on rakennettu erilaisia valmiita toimintoja, joita voi vaihtaa ja muokata. Myös oman objektin luominen on mahdollista. Kirjasto suosittelee objekteja automaattisesti työkalusi mukaan. Properties eli ominaisuusnäkyssä voidaan muokata yksittäisen objektin ominaisuuksia, kuvassa 18 oikealla (FlexSim Software Products Oy, 2025).

4.3 FlexSim-prosessinvirtaus ja logiikan ohjelmointi

FlexSim-ohjelmistossa mallin rakennuksen ydin on logiikassa, joka ohjaa mallin käyttäytymistä. Tämän osion tarkoitus on luoda ymmärrys siitä, miten FlexSim-ohjelmistossa eri objektit saadaan toimimaan mallissa ja miten niiden välinen vuorovaikutus voidaan ohjelmoida niin, että se vastaa todellista järjestelmää. Mallin tulee jäljitellä prosesseja, resursseja, tuotteiden liikkeitä, viiveitä, pullonkauloja ja valintoja realistisesti ja kopioiden

oikeaa järjestelmää. FlexSim-logiikka perustuu tapahtumapohjaiseen mallintamiseen, jossa mallin objektit reagoivat tiettyihin tapahtumiin, kuten tuotteiden saapumiseen, käsittelyn valmistumiseen tai resurssin vapautumiseen. Yksinkertainen esimerkki on se, kun tuote saapuu prosessille, mikä laukaisee käsittelyn aloittamisen (FlexSim Software Products Oy, 2025).

Prosessivirtausnäkyminen on siis FlexSimin toinen päätyötila (kuva 19). Siinä rakennetaan prosessivirtaa. Prosessivirran yksi peruskomponentti on tokeni, joka on vihreä ympyrä kuvassa 20. Tokenit ovat objekteja, jotka kulkevat prosessivirran läpi eli ne vastaavat prosessivirtausnäkyvässä 3D-mallin kappaleita tai tuotteita eli virtausesineitä. Tokeni voi edustaa mitä tahansa sen haluaakaan fyysisesti edustavan ja sille voidaan antaa myös abstrakteja merkityksiä. Usein tokeni kytketään prosessivirrassa vastaamaan 3D-mallissa kulkevaa tuotetta. Yksinkertaisesti tokeni on nippu tietoa, joka liikkuu prosessivirran läpi. Yleisimpiä tokeniin sidottuja tietoja ovat ID eli yksilöllinen tunnistenumero tai nimi, joka auttaa muistamaan tokenin tarkoituksen. Tokeniin sidotaan usein myös erilaiset parametrit, joita tuotteen mukana halutaan liikutella (FlexSim Software Products Oy, 2025).



Kuva 20. Tokeni (FlexSim Software Products Oy, 2025)

FlexSimissä tehtävillä on usein muttei aina tehtävän suorittaja, joka on selitetty aikaisemmin kappaleessa 4.3. Sen avainrooli on mahdollistaa tehtävän suoritus. Erilaiset tehtävät taas muodostavat Task Sequencesejä eli tehtävärakenteita, joissa määritellään, mitä tulee tehdä, missä järjestyksessä ja millä ehdoilla. Esimerkiksi noudetaan tuote hyllystä ja viedään se työasemalle käsiteltäväksi, odotetaan käsittely ja viedään tuote pakkaukseen. Näin mallissa luodaan työnkulkua. Toinen keskeinen logiikkarakenteen osa-alue on ehdollisten päätösten teko. Tuote tai objekti saattaa liikkua mallissa erilaisten tekijöiden tai sääntöjen vaikutuksesta. FlexSimissä tätä logiikkaa ratkotaan esimerkiksi Decision Point-

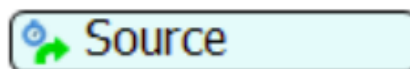
elementillä eli päätöspisteillä, jotka määrittelevät mihin suuntaan objekteja tai tuotteita liikutellaan riippuen olosuhteista. Tämä mahdollistaa epälineaaristen järjestelmien luomisen (FlexSim Software Products Oy, 2025).

FlexSim on mahdollista mukauttaa monimutkaisimpiinkin logiikoihin, mikäli valmiit rakennuspalikat eivät riitä. Käyttämällä sen omaa FlexScript-ohjelmointikieltä voidaan luoda mukautettuja ratkaisuja erilaisiin ympäristöihin. Esimeriksi yksittäinen vaihe, joka vaatii monien ehtojen ja tilastojen yhdistelyä voidaan toteuttaa FlexScriptin avulla (FlexSim Software Products Oy, 2025). Kuvassa 21 on esimerkki FlexScript-koodin osasta, jolla haetaan parametria.

```
Model.parameters.Parameter1  
Model.parameters["Parameter1"].value
```

Kuva 21. FlexScript-ohjelmointikieli (FlexSim Software Products Oy, 2025)

Aktiviteetilla viitataan loogiseen operaatioon tai vaiheeseen prosessivirrassa. Aktiviteetteja ovat siis lähes kaikki rakennuspalikat, joita prosessivirrassa on. Kuvassa 22 on esimerkki yhdestä aktiviteetista, source eli lähde. Aktiviteetti sisältää valittua logiikkaa ja kun tokeni siirtyy aktiviteettiin, valittu logiikka suoritetaan. Logiikka voi olla esimerkiksi tokenin luonti, kuten kuvan 22 aktiviteetti source tekee, tai tunnisten lisäys tokenille. Osa aktiviteeteistä tapahtuu ilman ajankulkua simulaatiokellossa, kun taas toiset aktiviteetit seuraavat simulointikelloa (FlexSim Software Products Oy, 2025).



Kuva 22. Source (FlexSim Software Products Oy, 2025)

FlexSim sisältää myös niin kutsuttuja jaettuja resursseja, jotka ovat usein rajallisia tai asettavat ehtoja. Tokenit lunastavat tai vapauttavat resurssia. Resurssia ei tule tulkita kui-

tenkaan perinteisen resurssi -sanan merkityksessä. Jaettu resurssi on hyvin samankaltainen ominaisuus kuin aktiviteetti, mutta resurssien erityispiirteitä on se, että ne voivat laittaa tokenin odottamaan, mikäli resurssi ei ole käytettävissä. Esimerkiksi yksi työntekijä käyttää useampaa konetta, jolloin toinen kone joutuu odottamaan resurssin ollessa käytettynä. Mallissa on kolme yleistä resurssityyppiä kuvan 23 mukaan:

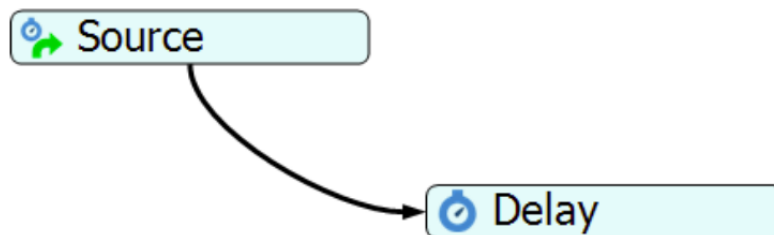
1. Lista, joka on lista tokeneista, työkulun kohteista, tehtävien suorittajista, tehtäväsarjoista, numeroista ja niin edelleen. Prosessivirta voi käyttää ja hyödyntää luetteloa.
2. Resurssi, joka tarkoittaa mallissa jotain rajoitetta tai rajallista määrää, joka voidaan hankkia tai vapauttaa.
3. Vyöhyke, joka kerää tilastotietoa ja se voidaan luoda aktiviteetin ympärille. Vyöhyke voi myös rajoittaa prosessivirran kulun tietyille vyöhykkeelle tilastollisten arvojen perusteella.

(FlexSim Software Products Oy, 2025).



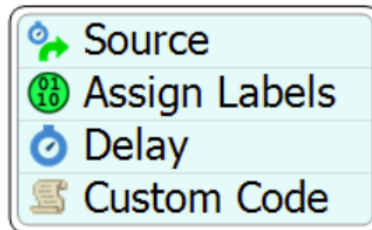
Kuva 23. Resource (FlexSim Software Products Oy, 2025)

Liitin tai yhdistin on yhteys aktiviteettien välillä (kuvan 24 musta nuoli). Simuloinnin aikana tokenit käyttävät liittimiä siirtyäkseen aktiviteetista seuraavaan (FlexSim Software Products Oy, 2025).



Kuva 24. Link (FlexSim Software Products Oy, 2025)

Lohko on joukko toimintoja, jotka on pinottu yhteen kuvan 25 mukaan. Pinotulla loholla voidaan helposti linkittää useita aktiviteetteja ja luoda vaihesarjoja. Tämä helpottaa vaihesarjojen liikuttelua mallissa. Lohkon sisällä aktiviteetit ovat linkittyneet suoraan toisiinsa samaan tapaan kuin liittimen avulla. Lohkossa aktiviteetti suoritetaan ylhäältä alaspäin (FlexSim Software Products Oy, 2025).



Kuva 25. Block (FlexSim Software Products Oy, 2025)

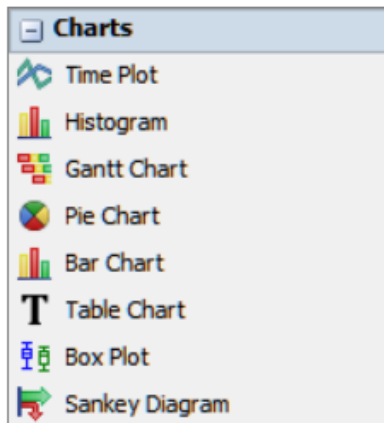
4.4 Tulosten esittäminen FlexSimissä

FlexSimissä dataa voidaan kerätä monella eri tapaa. Osa datasta syntyy automaattisesti 3D-mallissa ja prosessinvirrassa liikkuvien objektien vuorovaikutuksesta niin kutsuttuun vakio-tilastoon, joka sisältää useimmin haluttuja tietoja ja niiden kertymisiä voidaan seurata reaaliajassa kuvan 26 mukaan. Dataa siirretään talteen FlexSimissä tilastointijärjestelmien avulla. Tilastoja voidaan tarkastella joko suoraan FlexSimissä ja luoda automaattisia kaavioita tai tilastotietueet voidaan ajaa myös ulos järjestelmästä Exceliin tai muihin taulukkolaskentaohjelmaan, jossa dataa voidaan tarkastella ja jalostaa itsenäisesti haluttuun raportointimuotoon (FlexSim Software Products Oy, 2025).

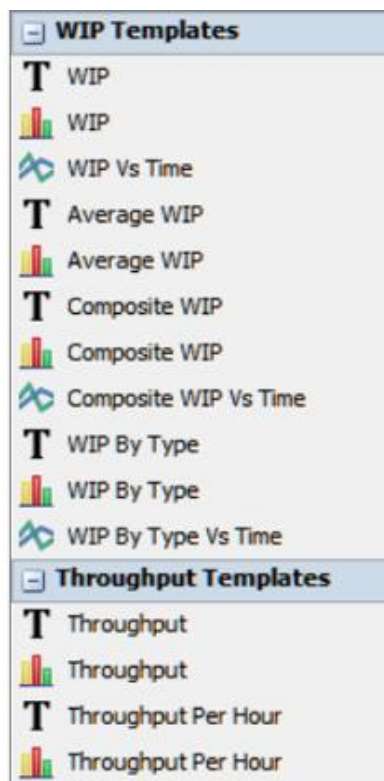
Statistics			
State processing			
Throughput			
Input		Output	
8.00		7.00	
Content			
Curr	Min	Max	Avg
1.00	0.00	1.00	0.94
Staytime			
Min	Max	Avg	
6.97	13.66	10.20	

Kuva 26. Statistics (FlexSim Software Products Oy, 2025)

Simulointimallin tilastoja voidaan esittää FlexSimin omissa kaaviotyökaluissa (kuva 27). FlexSim sisältää valmiiksi erilaisia kaaviopohjia, joiden avulla voidaan luoda nopeasti ha-
luttuja kaavioita (kuva 28) (FlexSim Software Products Oy, 2025).

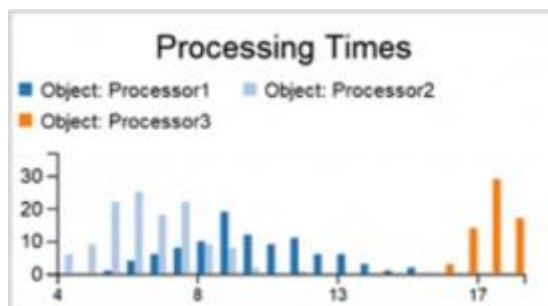


Kuva 27. Charts (FlexSim Software Products Oy, 2025)



Kuva 28. Templates (FlexSim Software Products Oy, 2025)

Esimerkki FlexSimissä luodusta kaaviosta kuvassa 29.



Kuva 29. Processing Time kaavio (FlexSim Software Products Oy, 2025)

Vakiotilastojen lisäksi malliin voidaan luoda kaaviopohjia, joiden avulla voidaan kerätä laajempia tilastoja. Yleisesti kerättyjä tilastoja voidaan jakaa kategorioihin taulukon kolme mukaan (FlexSim Software Products Oy, 2025).

KATEGORIA	SELITYS
SISÄLTÖ / LISTA	Listaa objektien määrän kohteessa tai prosessissa. Esimerkkikohteita KET-tilastot tai puskurivarastojen seuranta.
TILA	Listaa objektin nykytilaa. Esimerkiksi lepotila ja käsittelytila. Voidaan käyttää esimerkiksi käyttöasteiden selvitykseen.
LÄPIMENOAIKA	Listaa kauanko virtauselementti viipyy tietyssä pisteessä. Esimerkkikohteita läpimenoajan seuranta.
TUOTOS	Listaa montako virtauselementtiä kulkee objektin lävitse. Esimerkkikohteena input ja output tilastointi.
MATKA	Seuraa suorittajan kulkemaa matkaa simulaatiossa. Esimerkkikohteena tilastoja trukin tai työntekijän kulkemasta matkoista.

Taulukko 3. Tilastokategoriat (FlexSim Software Products Oy, 2025 mukailten)

5 Simulaatiotutkimuksen toteutus

Tässä kappaleessa tarkastellaan itse simulaatiotutkimuksen toteutusta ja tuloksia. Käydään ensin läpi vaiheittain avattuna miten prosessi eteni, jonka jälkeen esitetään simulaatiotyön tulokset ja tulosten analyysit.

5.1 Tutkimuksen vaiheet ja niiden toteutus

Tutkimuksen kulku ja simulaation rakennus on kuvattu kappaleessa 2.8 kuvatun seitsemänvaiheisen simulaatiotutkimuksen mukaisesti. Vaiheiden kuvaus on yleisluontoinen työn luottamuksellisuuden takia. Simuloinnin tarkempi dokumentointi on luovutettu Hitachi Energy Oy:lle.

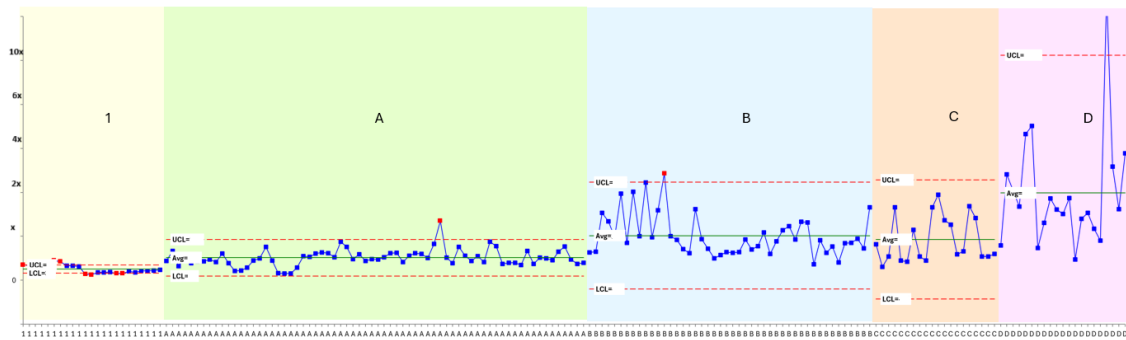
Vaihe 1: Tutkimusongelman muodostaminen. Simulaatio on luotu vastaamaan diplomi-työn tutkimuskysymyksiin. Tutkimuskysymykset ovat:

- Onko uuden tehtaan kapasiteetti riittävä vastaamaan tulevaisuuden kasvu- ja myyntiennusteisiin?
- Miten hyvin uusi tehdas kestää nykyisenkaltaista vaihtelua ja miten sitä voidaan hallita?

Simulaatiotutkimuksen tärkeimmät tavoitteet Hitachi Energy Oy:n näkökulmasta olivat todentaa uuden tehtaan kapasiteetti ja etsiä ratkaisuja vaihtelunhallintaan. Tämä toteutettiin vaihtamalla erilaisia parametreja ja tutkimalla tuotepainotusten vaihtumisten vaikutuksia.

Vaihe 2: Datan keräys ja konseptimallin luominen. Yrityksessä oli kerätty kattavasti dataa uuden tehtaan suunnitteluun liittyen ja se oli hyvin hyödynnettävissä simulaatiotutki-

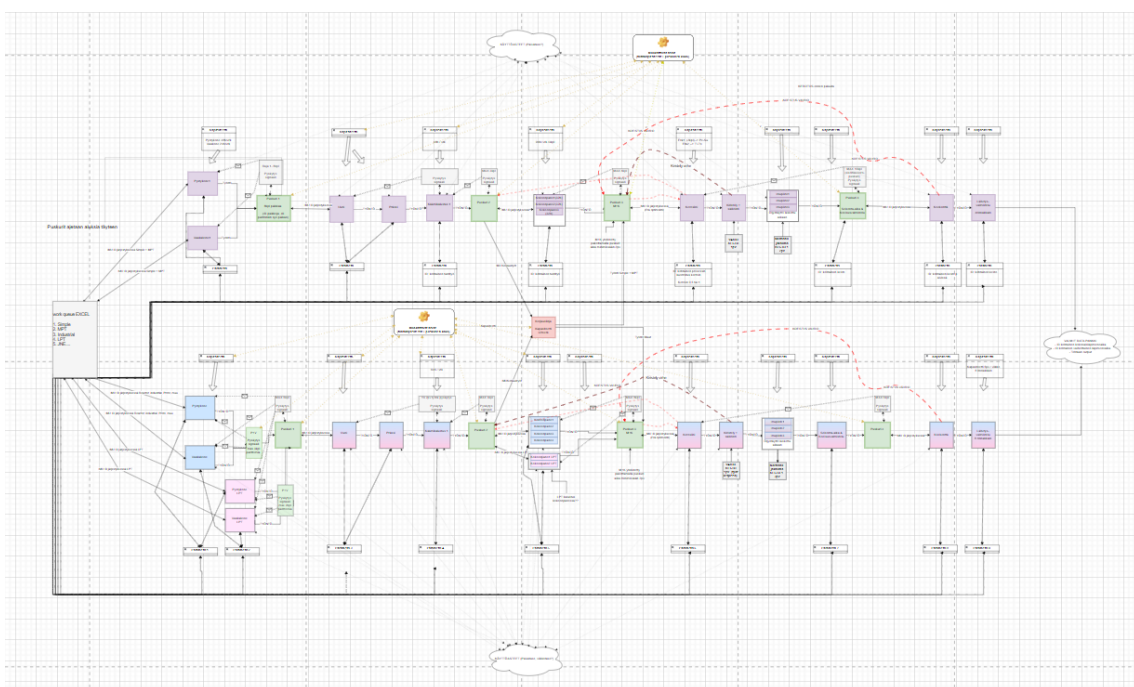
muksessa. Esimerkiksi historiadataa työvaiheiden vaiheajoista, läpimenoajoista, vaihte-
lusta ja ennustettujen työmäärien toteutumisesta oli olemassa, kun tutkimusta aloitetti-
tiin. Myös uutta dataa kerättiin tutkimusta varten, kuten tuotteiden eräkoot simulaatio-
mallin eri vaiheissa ja uusien tuoteperheiden tiedot. Datan keräyksessä hyödynnetty
DMADV Six Sigma -menetelmää. Menetelmän järjestelmällinen lähestyminen helpotti
oikean datan keräämisessä. Alla yksi esimerkki pohjatiedoksi kerätystä datasta ja sen ja-
lostamisesta. Kuvassa 30 on tutkittu tuotteiden sisäistä vaihtelua ja luokiteltu ne vaihte-
lun mukaan omiin ryhmiin. Datan keräysprosessia on avattu tarkemmin kappaleessa
kolme.



Kuva 30. Esimerkkidata (Hitachi Energy Oy, 2025)

Konseptimallin rakentaminen, laajuuden ja tarkkuuden määrittäminen tehtiin yhdessä
Hitachi Energy Oy:n asiantuntijoiden ja yliopiston ohjaajan kanssa. Konseptia alettiin ra-
kentaa pala kerrallaan samalla järjestelmää opiskellen ja tutkien. Konseptimallin raken-
tamista tehtiin yksin tai pienellä ryhmällä, mutta siihen kerättiin laajasti näkemyksiä ja
mielipiteitä Hitachi Energy Oy:n henkilöstöltä ja asiantuntijoilta useilla haastattelu- ja
esittelykierroksilla. Konseptimallin rakennuksessa hyödynnettiin kirjallisuuskatsauksessa
läpi käytyjä tuotannonohjausteorioita. Esimerkiksi Lean-ajattelusta tuttuja elementtejä,
kuten imuohjaus, kanban ja CONWIP-tyyppisiä ratkaisuja löytyy konseptimallin sisältä.
Tuotantojärjestelmästä selvitettiin ensimmäisenä tuotteiden kriittinen polku. Kriittisen
polun selviämisen jälkeen tutkittiin, millaisia erilaisia sääntöjä eri vaiheisiin liittyy ja lisät-
tiin puskurivarastoja tarvittaessa työvaiheiden välille. Konseptimalli sisälsi myös erilaisia
häiriösignaaleja ja pysäytystoimintoja. Konseptimallin ja myöhemmin simulointimallin

tärkein tarkoitus oli vastata tutkimuskysymyksiin, mutta siitä rakennettiin joustava, jolloin se soveltuu myös muihin käyttötarkoituksiin ja on analysoitavissa laajemminkin. Konseptimallin rakennusvaiheessa myös määritettiin alustavasti tehtaan tarvittavia resursseja analysoimalla dataa ja luomalla keskiarvoihin perustuvia oletuksia. Tehtaan tarvittavista resursseista muodostui siis alustava arvio jo konseptimallin rakennusvaiheen aikana.



Kuva 31. Konseptimalli

Vaihe 3: Konseptimallin validointi. Konseptimallin validiteetti varmistettiin pitämällä useita iterointikiertoja, joissa mallia tarkastettiin. Tässä tutkimuksessa luotiin uutta järjestelmää, jonka takia tarkistuskierroksia oli useita ja validointivaiheesta palattiin suunnittelupöydälle useita kertoja. Lopulta mallista saatiin rakennettua riittävän tarkka ja todennukainen eli validi, jotta voitiin luottavaisesti siirtyä tietokonemallinnukseen. Konseptimallin validiteettiin jouduttiin kuitenkin palaamaan tietokonemallinnuksen aikana, sillä mallia rakentaessa FlexSim-ohjelmistolla paljastui mallista joitakin virheitä, joita ei konseptimallia rakennettaessa osattu vielä hahmottaa.

Vaihe 4: Tietokonemallinnus FlexSimillä. Tietokonemallinnus suoritettiin yhteistyössä Delfoi Consulting Oy:n kanssa, jolta saatiin apua ja koulutusta valitun FlexSim-järjestelmän käyttämiseen ja erityisesti tietokonemallin ohjelmoinnissa. Ohjelmistoa ja sen valintaperusteita on esitelty kappaleessa neljä. Ulkopuoliseen apuun päädyttiin, kun työn todellinen laajuus ja monimutkaisuus alkoi hahmottua. Konseptoitu tuotantojärjestelmä haluttiin kuitenkin mallintaa kokonaisuudessaan, sillä tutkimuksesta saatava aineisto jäisi liian suppeaksi, jos mallin laajuutta olisi pienennetty. Tietokonemallia rakennettiin yhdessä Delfoi Consulting asiantuntijan kanssa ja toimintaperiaate oli, että asiantuntija rakensi tietokonemallia ja samanaikaisesti sitä koeajettiin sekä testattiin, jolloin mallin rakennus tapahtui järjestelmällisesti ja mahdolliset virheet huomattiin aikaisessa vaiheessa. Tietokonemallia rakennettaessa hyvin luotu konseptimalli nopeutti prosessia merkittävästi.

Tietokonemallinnus suoritettiin FlexSimissä 3D- ja Proses Flow-toiminnoissa, jotka on esitelty kappaleessa neljä. Tietokonemallin tarvitsema Input data, kuten työjono, vaiheiden kapasiteetit ja puskurien koko syötettiin malliin Excel-tiedoston avulla ja mallin Output data, kuten läpimenoajat, puskurien kuormitus tai käyttöasteet, ajettiin Excel-tiedostoon. Näin tietokonemallin tuottama data oli jalostettavissa useisiin käyttötarkoituksiin. 3D-malli luotiin hyvin yksinkertaistetusti käyttämällä erimuotoisia ja eri värisiä kappaleita kuvastamaan tuotteita ja komponentteja. Tämä helpotti prosessin seuraamista ja mallin tarkastelua. Kuvassa 32 on havainnoitavissa 3D-malli, joka rakennettiin suoraan konseptimallin päälle. 3D-mallissa eri tuotteet virtaavat niille annettujen sääntöjen mukaisesti seuraten simulaatiokelloa. Simulaatiokello toimii mallissa jopa sekunnin tarkkuudella.



Kuva 32. FlexSim 3D-malli

Tietokonemallinnuksen logiikka toteutettiin kuitenkin Proses Flow-näkymässä ja logiikan rakentamisprosessia on avattu paremmin kappaleessa neljä. Esimerkkinä kerosiini-kuivausvaiheen mallinnusta havainnollistava kuva 33. Prosessin mallintamiseen FlexSimistä löytyi jonkin verran valmiita komponentteja, joiden avulla mallia rakennettiin luomalla tuotantovirtauksen logiikkaa.


```

Valtse tyo uunin - Custom Code
1 /**Custom Code*/
2 Object current = param(1);
3 treenode activity = param(2);
4 Token token = param(3);
5 treenode processFlow = ownerObject(activity);
6
7 string seurattavat = Table("Parametric")["Uuni pysäytyspaivat"][2];
8 string paivaNyt = GetTime("day",Model.Time);
9 if (!seurattavat.includes("#"+paivaNyt+"#")){
10  Object uuni = model().find("Li_uuni");
11  Object puskuril = model().find("Li_puskurii");
12  if (uuni.myStatus == ""){
13    int pienin_jonojarjestys = -1;
14    //Jos ei ole keskeneristä erää, niin otetaan pienimman id:n Eralaskuri=1.
15    if (uuni.Eratunnus == ""){
16      for (int i=1; i<=puskuril.subnodes.length; i++){
17        Object item_tmp = puskuril.subnodes[i];
18        if (item_tmp.Eraamaara?){ // Puskuril:ssa on myös keskenerisiä toita, joita ei voi vielä ottaa uuniin. Niilla ei ole eratunnusta merkittynä
19          uuni.Eratunnus = item_tmp.Jonojarjestys;
20          break;
21        }
22      }
23    }
24    if (uuni.Eratunnus != ""){ // Etsi pienin Eralaskuri eratunnuksen sisällä
25      int pienin_erajarjestys = -1;
26      Object founditem;
27      for (int i=1; i<=puskuril.subnodes.length; i++){
28        Object item_tmp = puskuril.subnodes[i];
29        if (item_tmp.Jonojarjestys == uuni.Eratunnus){
30          if (item_tmp.Eralaskuri < pienin_erajarjestys || pienin_erajarjestys == -1){
31            pienin_erajarjestys = item_tmp.Eralaskuri;
32            founditem = item_tmp;
33          }
34        }
35      }
36    }
37    Token newToken = Token.create(NULL, getactivity("ProcessFlow", "Uusi tyo uunille Li"), 0);
38    newToken.item = founditem;
39    releasetoken(newToken);
40  }
41 }
42 }
43

```

Kuva 34. FlexScript-ohjelmointikieli

Vaihe 5: Verifiointi. Tietokonemallia verifioitiin useilla koeajoilla ja kokeilemalla erilaisia ääriolosuhteita eli toisin sanoen suoritettiin herkkyyssanalyysi. Tietokonemallia verifioitiin myös useilla iterointikierroksissa, joissa Delfoi Consulting Oy:n asiantuntija loi versioita ja niitä koeajettiin rinnakkain samalla mallia rakentaen. Tietokonemallin tuloksia vertailtiin historiasta saatuun dataan. Tuloksia arvioitiin Hitachi Energy Oy:n sekä Delfoin Consulting Oy:n asiantuntijoiden kanssa. Tietokonemallin koodit ja logiikka käytiin läpi yksityiskohtaisesti, jotta mahdollisia virheitä löytyisi ja toisaalta koodin ymmärtäminen mahdollisesti tietokonemallin uudelleenohjelmointia itsenäisesti. Verifiointivaiheesta palattiin myös useita kertoja takaisin ohjelmointiin, mutta lopulta tietokonemallin kanssa päästiin onnistuneesti tavoitteeseen tiukasta aikataulusta huolimatta.

Vaihe 6: Suunnittelu, toteutus ja analysointi. Simulointia varten luotiin simulaatio suunnitelma, joka on esitetty liitteessä yksi. Suunnitelmasta käy ilmi millaisia skenaarioita simuloidaan ja mitkä ovat niiden tavoitteet. Simulaatio suunnitelma luotiin yhdessä Hitachi Energy Oy:n asiantuntijoiden kanssa ja se esiteltiin laajemmalle ryhmälle ennen aloitusta, jolloin saatiin kerättyä kattavasti mielipiteitä siitä, millaisia skenaarioita tulisi simuloida. Simulaatio suunnitelma löytyy myös ohjeet erilaisten skenaarioiden ajoon. Skenaariot

esitellään kappaleessa 5.2. Simulaation tulosten analyysi on tuotettu keräämällä huomiota kustakin skenaariosta ja vertailemalla niitä toisiinsa. Tulokset ja analyysi esitellään kappaleessa 5.3.

Vaihe 7: Dokumentointi. Dokumentointi on tehty osana diplomityötä ja tulokset tallennettu Hitachi Energy Oy:n käyttöön. Dokumentoinnin tavoitteena on tutkimuksen toistettavuus. Hitachi Energy Oy:lle luovutetuista tiedostoista löytyy tallenteet kaikista simulaatioista, käytetyistä parametreista ja työjonoista sekä saaduista tuloksista. Nämä on esitetty liitteessä kaksi. Noudattamalla simulaatiosuunnitelmaa ja käyttämällä dokumentoituja tietoja voidaan jokainen skenaario toistaa samankaltaisena uudelleen tarkasteltavaksi.

5.2 Simulaatioskenaariot ja tulokset

Tässä kappaleessa käydään yleisesti läpi eri skenaarioiden asetukset ja viitataan tuloksiin. Tähän tutkimukseen valittiin yhteensä yhdeksän skenaariota simuloitavaksi. Skenaariot 1–3 tutkivat puskurivarastoinnin merkitystä, 4–5 tutkivat tuotannonhäiriöiden merkitystä, skenaariot 6–7 tutkivat tuottavuuden merkitystä ja skenaariot 8–9 tutkivat tuoterhympäpainotusten vaihtelun merkitystä tuotantojärjestelmässä. Kaikille skenaarioille yhteisiä ominaisuuksia olivat simuloinnin pituus. Simuloinnit kuvastavat vuoden mittaista jaksoa, josta on vähennetty neljän viikon kesäloma. Analyysejä tehdessä tehtiin kuitenkin havainto, ettei yhden vuoden data ole tarpeeksi kattavaa kuvastamaan tiettyjä kaavoja ja toistuvia kuvioita tuotantojärjestelmässä. Tutkimuksessa simuloitiin siksi kahden vuoden ajanjakso, joiden keskiarvoa esitetään simulaation yhden vuoden tuloksena. Toinen yhdistävä tekijä kaikissa skenaarioissa on tuotantojärjestelmä, joka pysyi lähes muuttumattomana kaikissa skenaarioissa.

5.2.1 Skenaario 1 - Pienet puskurivarastot

Skenaarioissa 1–3 käytetään samaa työjonoa, häiriöastetta ja kapasiteettia. Muutettava arvo on puskurivarastojen koko. Skenaariossa yksi käytetään niin pieniä puskurivarastoja kuin tietokonemalli sallii. Tulokset esitetty liitteessä kaksi.

5.2.2 Skenaario 2 - Suuret puskurivarastot

Skenaarioissa 1–3 käytetään samaa työjonoa, häiriöastetta ja kapasiteettia. Muutettava arvo on puskurivarastojen koko. Skenaariossa kaksi puskurivarastojen koot on määritetty niin, etteivät ne missään tilanteessa toimi tuotannon rajoitteena. Tulokset esitetty liitteessä kaksi.

5.2.3 Skenaario 3 - Optimoidut/realistiset puskurivarastot

Skenaarioissa 1–3 käytetään samaa työjonoa, häiriöastetta ja kapasiteettia. Muutettava arvo on puskurivarastojen koko. Skenaariossa kolme puskurivarastojen koot on määritetty niin, että ne huomioivat realistisesti uuden tilan rajoitteet sekä laatuvaatimukset, jotka estävät liian pitkät puskurivarastoinnit.

Skenaario kolme toimii myös skenaarioiden 4–5, sekä skenaarioiden 6–7 välimallina ja edustaa täten tutkimuksen keskinkertaisinta tulosta. Tulokset esitetty liitteessä kaksi.

5.2.4 Skenaario 4 - Suuri häiriöaste

Skenaarioissa 4–5 käytetään samaa työjonoa, kapasiteettia ja puskurivarastoja kuin skenaariossa kolme. Muutettava arvo on häiriöaste. Skenaariossa neljä häiriöastetta on nostettu merkittävästi, mikä tarkoittaa pysäytyksiä tuotannossa sekä kiristely- ja koeistusvirheitä. Tulokset esitetty liitteessä kaksi.

5.2.5 Skenaario 5 - Häiriötön tuotanto

Skenaarioissa 4–5 käytetään samaa työjonoa, kapasiteettia ja puskurivarastoja kuin skenaariossa kolme. Muutettava arvo on häiriöaste. Skenaariossa viisi häiriöaste on laskettu nolnaan, mikä tarkoittaa sitä, ettei tuotannossa ole pysäytyksiä tai kiristely- ja koeistusvirheitä. Tulokset esitetty liitteessä kaksi.

5.2.6 Skenaario 6 - Tuottavuus heikkenee

Skenaarioissa 6–7 käytetään samaa työjonoa, häiriöastetta, kapasiteettia ja puskurivarastoja kuin skenaariossa kolme. Muutokset tapahtuvat tuottavuudessa. Skenaariossa kuusi tuottavuus laskee 10 %. Lasku koskee vaiheita, joissa työtä suoritetaan henkilövoimin. Tulokset esitetty liitteessä kaksi.

5.2.7 Skenaario 7 - Tuottavuus paranee

Skenaarioissa 6–7 käytetään samaa työjonoa, häiriöastetta, kapasiteettia ja puskurivarastoja kuin skenaariossa kolme. Muutokset tapahtuvat tuottavuudessa. Skenaariossa seitsemän tuottavuus nousee 20 %. Nousu koskee vaiheita, joissa työtä suoritetaan henkilövoimin. Tulokset esitetty liitteessä kaksi.

5.2.8 Skenaario 8 - Kysyntävaihtelu SPT ja MPT välillä

Skenaariossa kahdeksan tarkastellaan, miten hyvin suunniteltu tuotantojärjestelmä kestää erilaisia kysyntätilanteita, joissa SPT- ja MPT -tuoteperheiden painotus vaihtelee. Skenaariossa sisällä on luotu viisi erillistä sisäskenaariota, joissa tuotepainotukset ovat:

1. SPT 100 %, MPT 0 %

2. SPT 75 %, MPT 25 %
3. SPT 50 %, MPT 50 %
4. SPT 25 %, MPT 75 %
5. SPT 0 %, MPT 100 %

Tulokset esitetty liitteessä kaksi.

5.2.9 Skenaario 9 - Kysyntävaihtelu Muut ja LPT välillä

Skenaariossa yhdeksän tarkastellaan, miten hyvin suunniteltu tuotantojärjestelmä kestää erilaisia kysyntätilanteita, joissa reactor ja industrial on yhteen niputettuna "Muut" ja LPT tuoteperheiden painotus vaihtelee. Skenaarion sisällä on luotu neljä erillistä sisäskenaariota, joissa tuotepainotukset ovat:

1. Muut 100 %, LPT 0 %
2. Muut 80 %, LPT 20 %
3. Muut 60 %, LPT 40 %
4. Muut 40 %, LPT 60 %

Tulokset esitetty liitteessä kaksi.

5.3 Simulaatiotulosten analyysi

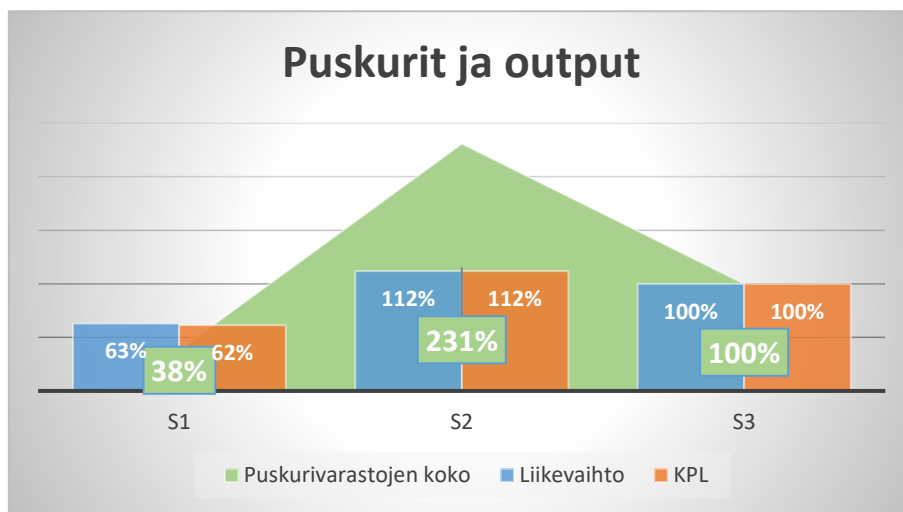
Tässä kappaleessa käydään yleisesti läpi eri skenaarioiden analyysit ja viitataan luotuun raporttiin. Analyysit on esitetty kategorioissa, joita ovat puskurivarastojen, häiriöasteen, tuottavuuden ja kysyntävaihtelun vaikutukset tuotantojärjestelmään.

5.3.1 Puskurivarastojen vaikutus

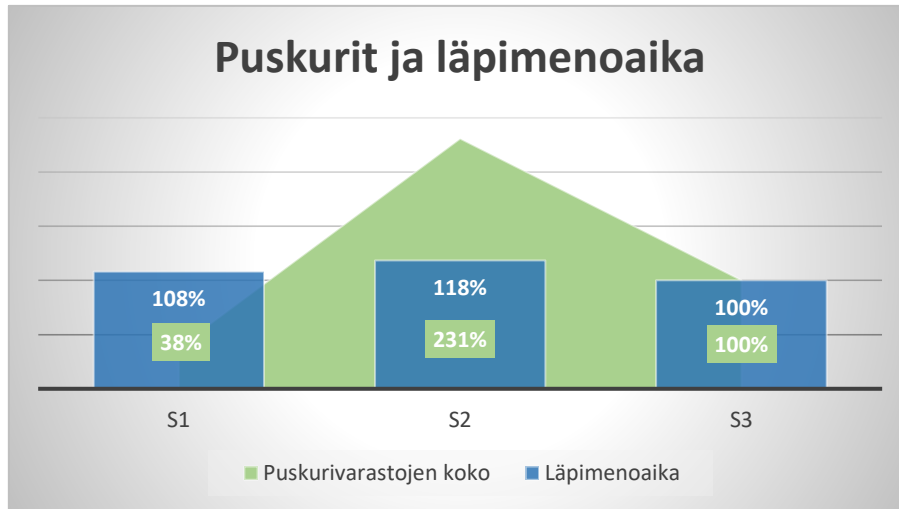
Skenaariot 1–3 tulokset osoittavat puskurivarastojen olevan tärkeä keino parantaa tehtaan toimintaa ja lieventää vaihtelun luomia ongelmia. Keskeisimmät havainnot:

- Pienet puskurivarastot rajoittavat tekemistä ja ovat tuotannon pullonkaula. Liikevaihto ja tuotetut kappalemäärät laskevat merkittävästi puskureita pienentäessä.
- Suuret puskurivarastot nostavat liikevaihtoa ja kappalemääriä, mutta kasvattavat läpimenoaikaa ja KET:tiä.
- Optimoidut puskurit tuottavat kohtalaisesti liikevaihtoa ja kappalemääriä, sekä madaltavat läpimenoaikaa, vaikka KET kasvaa skenaarioon yksi verraten ja puskurit pienentyvät merkittävästi skenaarioon kaksi verraten.

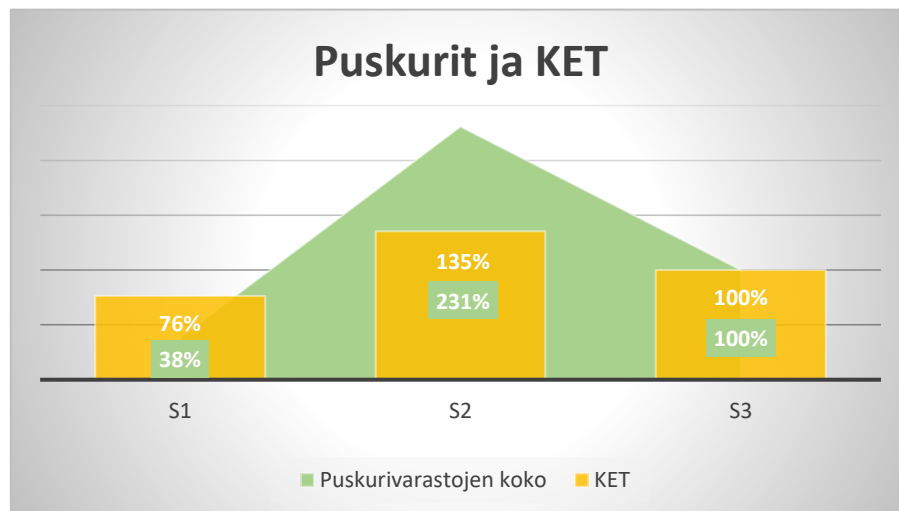
Tarkemmat analyysit ja taulukot liitteessä kolme.



Taulukko 4. Puskurit ja output



Taulukko 5. Puskurit ja läpimenoaika



Taulukko 6. Puskurit ja KET

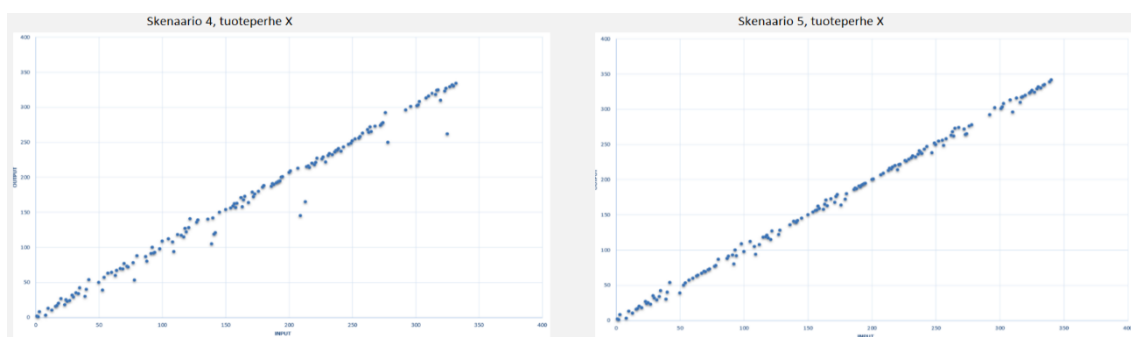
5.3.2 Häiriöasteen vaikutus

Skenaarioissa 4–5 vaihdettiin häiriöasteen suuruutta tuotannossa. Keskeiset havainnot:

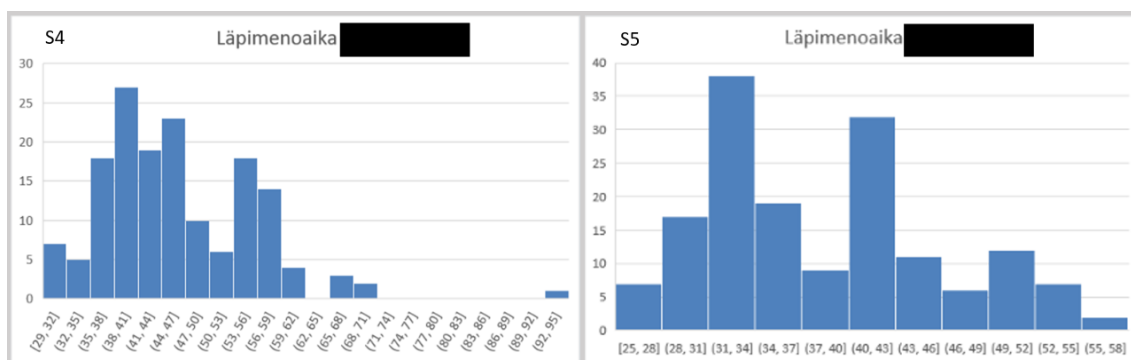
- Tuotannon FIFO toteutuu huonosti häiriöasteen ollessa korkea, mikä saattaa vaikuttaa toimitusvarmuuteen ja laskea liikevaihtoa toimitussakkojen muodossa, joita simulaatiomalli ei osaa huomioida. Tämä on merkittävin ja konkreettisin häiriöistä aiheutuva ongelma.

- Matala häiriöaste tasaa läpimenoaikoja tuoteperheissä, joiden sisäinen vaihtelu on muutoinkin vähäistä.
- Tuotanto kestää muutoin hyvin erilaisia häiriöitä laskettuna kappalemäärissä ja liikevaihdossa, koska skenaarion kolme mukaiset puskurit antavat tuotannolle joustoa. Lisäksi häiriöiden lisääminen tasaa tuotannossa luonnostaan esiintyvää vaihtelua, kun suhteelliset erot läpimenoajoissa laskevat.
- Läpimenoajat kasvavat hieman häiriöasteen ollessa korkealla.

Tarkemmat analyysit ja taulukot liitteessä kolme.



Kuva 35. Jonojärjestys



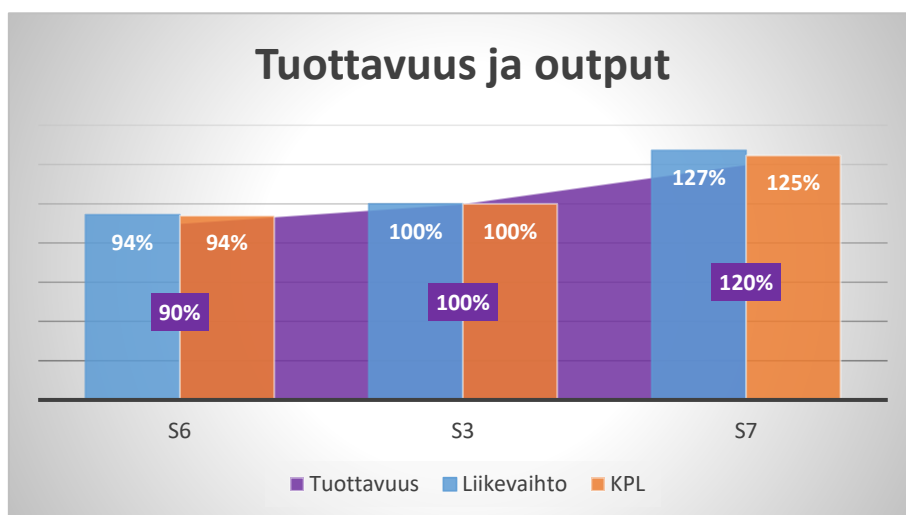
Kuva 36. Läpimenoaika

5.3.3 Tuottavuuden vaikutus

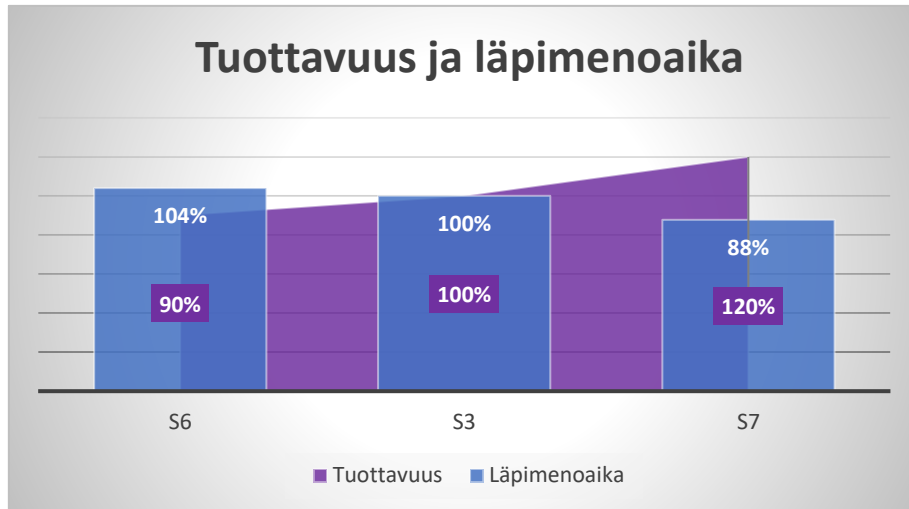
Skenaarioiden 6–7 tulokset havainnollistavat tuottavuuden kehityksen merkitystä. Keskeiset havainnot:

- Tuottavuuden 10 % heikentyminen aiheuttaa liikevaihdossa ja kappalemäärässä laskua noin 6 %.
- Tuottavuuden 20 % kehitys tuottaa liikevaihtoa ja kappalemäärän nousua noin 27 %.
- Matala tuottavuus pidentää läpimenoaikaa ja kasvattaa KET:tiä.
- Tuottavuuden kehitys laskee läpimenoaikaa, mutta kasvattaa samalla KET:tiä maltillisesti.
- Tuottavuuden paraneminen on erityisen hyödyllistä käämintä-, kokoonpano- ja lähetysvalmisteluvaiheissa, koska vaiheet toimivat pullonkauloina tuotannolle. Muissa vaiheissa tuottavuuden parantuminen on lähes merkityksetöntä kokonaisuuden kannalta.

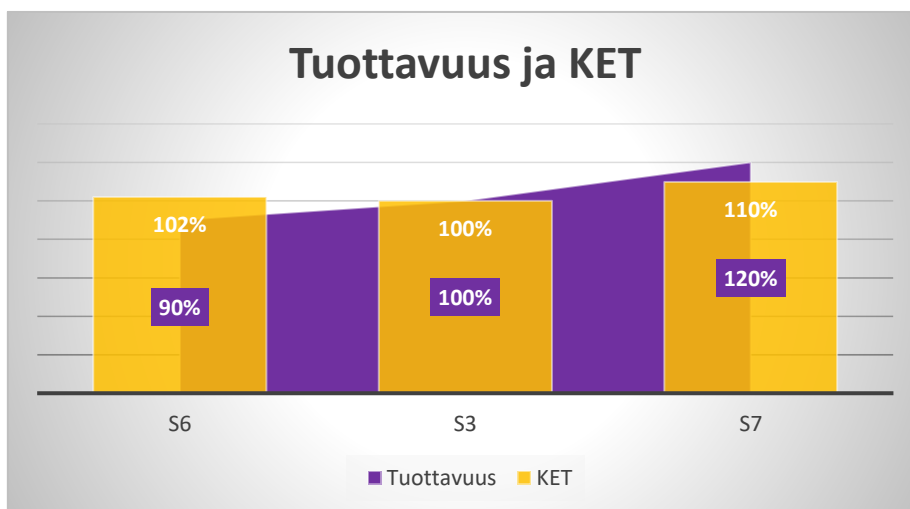
Tarkemmat analyysit ja taulukot liitteessä kolme.



Taulukko 7. Tuottavuus ja output



Taulukko 8. Tuottavuus ja läpimenoaika



Taulukko 9. Tuottavuus ja KET

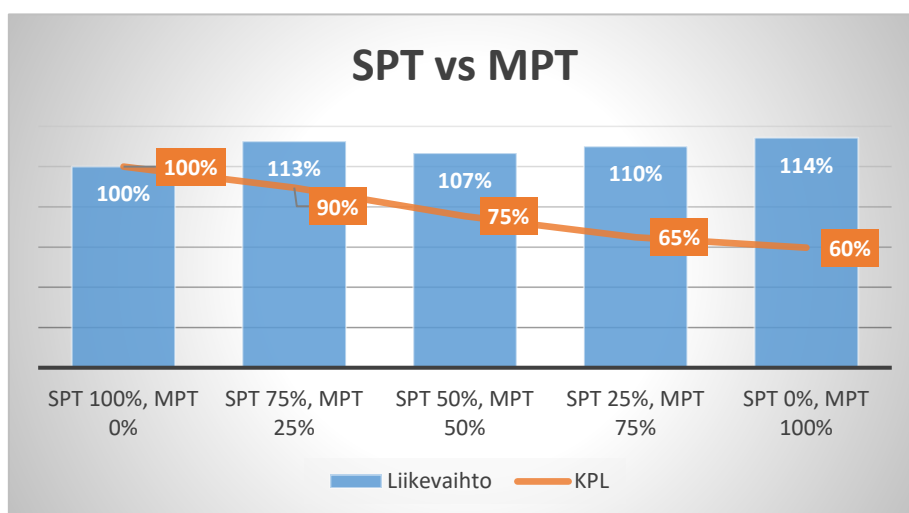
5.3.4 Kysyntävaihtelujen vaikutus

Skenaarioiden 8–9 tulokset havainnollistavat kysyntävaihtelujen vaikutusta. Keskeiset havainnot:

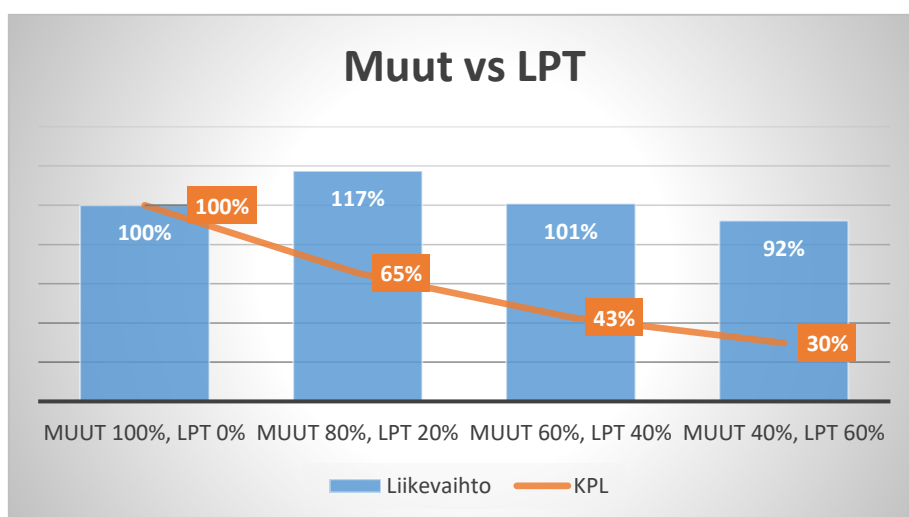
- Kysyntävaihtelu SPT- ja MPT -linjalla 1 ei vaikuta merkittävästi linjan toimivuuteen tai liikevaihtoon, koska kappalemäärän tippuessa liikevaihtotavoite täyttyy nousvan keskihinnan ansiosta.

- Linjalla 2 kannattaa valmistaa tietty määrä LPT-tuoteperhettä parhaan mahdollisen liikevaihdon ja linjan toimivuuden kannalta, mutta liiallinen määrä LPT-tuotteita aiheuttaa liikevaihdon ja linjan toiminnan heikkenemistä.
- Käämikoneet täytyy allokoida uudelleen jokaisessa kysyntätilanteessa linjojen välillä, mikä on tuotannonohjauksen kannalta erittäin haastavaa.

Tarkemmat analyysit ja taulukot liitteessä kolme.



Taulukko 10. SPT vs MPT



Taulukko 11. Muut vs LPT

5.3.5 Muut simulaation sovellutukset

Hitachi Energy Oy:lle luovutetuissa laajemmissa dokumenteissa simulaation avulla tutkittiin myös tarkemmin pullonkauloja sekä luotiin arvioita tilankäyttöön liittyen. Pullonkauloja tutkittiin käyttöasteen ja puskurivarastojen kuormituksen avulla. Toinen lähestymistapa oli määrittää vain yhden vaiheen kapasiteetti kerrallaan ja poistaa muut rajoitteet järjestelmästä. Näin löydettiin absoluuttisia pullonkauloja. Tilankäyttöä ja tarvetta arvioitiin keskeneräisen työn määrällä järjestelmän vaiheissa. Simulaatiomalli saatiin myös muokattua vastaamaan nykyistä tuotantojärjestelmää ja tutkimuksen jatkona olisi hyvä tutkia myös nykyistä tuotantojärjestelmää.

6 Loppupäätelmät ja yhteenveto

Tämä diplomityö käsittelee tuotantosimulaation hyödyntämistä uuden tehtaan kapasiteettisuunnittelussa ja vaihtelunhallinnassa. Tässä osiossa esitetään lyhyesti tutkimuskysymyksiin liittyvät tulokset.

Onko uuden tehtaan kapasiteetti riittävä vastaamaan tulevaisuuden kasvu- ja myyntiennusteisiin?

Kuten tässä tutkimuksessa on osoitettu, simulaatio on erinomainen työkalu tarkastella ja kehittää uuden tehtaan konseptia. Simulaatio on edullinen ja nopea tapa kokeilla erilaisia toimintamalleja ja niiden vaikutusta tehtaan toimintaan. Simulaatio auttaa tunnistamaan merkittäviä puutteita tai havaitsemaan merkittäviä ongelmia tarpeeksi aikaisessa vaiheessa, ennen kuin esimerkiksi rakentaminen on käynnistynyt tai hankintoja tehty, jolloin ratkaisuja voidaan vielä muuttaa kustannustehokkaammin. Toisinaan puutteen korjaus jälkikäteen voi olla niin kallista, ettei optimiratkaisu toteudu koskaan. Simulointi on myös erinomainen tapa oppia tehtaan toimintaa, saada käsitys valmistusprosessista sekä tarvittavista resursseista ja kapasiteeteista kokonaisuudessaan. Simulaatiomallin data on helposti jalostettavissa ja simuloinnin avulla voidaan tutkia erilaisia kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Simulaatiomallilla pystyttiin luotettavasti osoittamaan, että uusi tehdas ja luotu konsepti pystyy vastaamaan kapasiteetiltaan tuotannon kasvutavoitteisiin erilaisissa skenaarioissa. Ainoastaan puskurivastojen niukkuus tai tuotavuuden merkittävä heikentyminen voisi estää tehdasta saavuttamasta tavoiteltua kapasiteettia.

Miten hyvin uusi tehdas kestää nykyisenkaltaista vaihtelua ja miten sitä voidaan hallita?

Simulaatiomallit sopivat erityisen hyvin ETO-tyyppisen tuotannon tutkimiseen, jossa tuotannon vaihtelu on tyyppillisesti suurta ja yksinkertaiset laskentapohjaiset ennusteet eivät anna realistista kuvaa tuotannosta. Simulaatiomalliin oli helppo syöttää erilaisia

häiriöitä esimerkiksi todennäköisyysjakaumiin tai tutkittuun tietoon perustuen. Simulaatiomallilla voitiin myös tutkia erilaisten tuotantoratkaisuiden ja kysyntätilanteiden vaikutusta nopeasti, mikä auttaa esimerkiksi tehtaan kuormituksen laskemisessa ja toimii ohjenuorana myynnille valintatilanteissa. Simulaatiomallilla tarkasteltiin erilaisia vaihtelunhallintastrategioita. Puskurivarastojen oikeanlainen hyödyntäminen auttoi löytämään tehokkaan suhteen keskeneräisen työn ja tehtaan outputin välille. Simulaatiomallin avulla voitiin todeta tuotantojärjestelmän kestävän hyvin kysyntävaihtelua edellyttäen, että resurssit pystytään todellisuudessaakin allokoimaan uudelleen oikea-aikaisesti.

6.1 Analyysin loppupäätelmät

Skenaarioiden 1–3 perusteella tehtaassa tulee olla riittävästi tilaa puskurivarastoille, sillä tuotanto tehostuu huomattavasti oikean suuruisilla puskurivarastoilla. Skenaarioiden 4–5 perusteella on perusteltua panostaa pysäytysten ja virheiden vähentämiseen tuotannossa, jotta FIFO toteutuu paremmin, jolloin on mahdollista parantaa toimitusvarmuutta ja asiakastyytyväisyyttä, koska tuotanto on ennakoitavampaa. Skenaariossa neljä häiriöiden määrän lisäys ei vaikuttanut tehtaaseen oletetun paljon sen tasaavan vaikutuksen takia. Tämän havainnon oppina nykyistä vaihtelua tulisi oppia hillitsemään tasaamalla työvaiheiden kestoa tuoteperheiden sisällä tuotannon eri vaiheissa. Esimerkiksi kokoonpanossa voidaan siirtää resursseja pieneltä työltä isolle työlle, jolloin vaiheiden läpimenoajat tasaantuvat. Kun tätä ajattelua toistettaisiin läpi linjan, läpimenoajat voisivat tasaantua merkittävästi.

Simulaatiomallissa käytetyt resurssit näyttäisivät riittävän ennustetun tuotemäärän ja liikevaihdon luomiseen, vain niukat puskurivarastot tai tuottavuuden heikentyminen estivät tehdasta pääsemästä tavoiteltuun kapasiteetin. Skenaario seitsemän osoittaa myös, että tehtaalla on merkittävästi kehityspotentiaalia. Simulaatio kuitenkin näyttää, että useissa vaiheissa käyttöasteet jäävät alhaisiksi, mikä kertoo yli-investoinnista. Toisaalta kyseiset vaiheet ovat kiinteitä resursseja, joita on hankala hankkia lisää jälkikäteen, ja siksi on hyvä, etteivät nämä vaiheet muodosta pullonkaulaa tuotantoon. Pullonkaulaa

tuotantojärjestelmässä näyttävät muodostavan käämintä, kokoonpano ja lähetysvalmistelu. Kaikkiin simulaatioajoihin on lisätty kääminnän kapasiteettia poiketen hankitusta ja suunnitellusta kapasiteetista. Hankitulla kapasiteetilla pullonkaula kääminnässä oli niin merkittävä, että kapasiteetti päätettiin nostaa jokaiseen simulaatioajoon, jolloin tuotanto alkoi toimia tasapainoisemmin.

Skenaarioiden kahdeksan ja yhdeksän perusteella voidaan sanoa, että tehdas kestää hyvin kysyntävaihtelua, sillä liikevaihto pysyttelee $\pm 17\%$ sisällä, vaikka simulaatioskenaariot kuvastavat ääritilanteita. Liiallinen määrä LPT-tuoteperhettä työjonossa saattaa kuitenkin laskea suorituskykyä. Tehtaan kokonaisliikevaihdon vaihtelu on todennäköisesti vielä lievempää, kun linjojen erilaiset tilanteet tasaavat toisiaan pitkällä aikavälillä. Haasteeksi muodostuu lähinnä resurssien uudelleen allokointi ja reagoinnin oikea-aikaisuus. Isompia haasteita syntyy, jos joko linjan 1 tai linjan 2 tuotteet yliedustuvat niin paljon, että joudutaan sekoittamaan linjojen kiinteitä resursseja sekaisin, jolloin vaaditaan järeämpiä muutoksia. Käämikoneiden linjoittainen jako on myös ongelmallista, sillä kysyntävaihtelut aiheuttavat aina käämikoneiden uudelleen allokointia linjojen 1 ja 2 välillä.

Tuotantojärjestelmän vaihtelua on vaikea vähentää, sillä vaihtelun juurisyy on ETO-tuotanto ja eri kokoiset ja pituiset työt. Vaihteluun voidaan kuitenkin reagoida ja sen haittavaikutuksia lieventää tuotantovaiheiden kapasiteettipuskurilla, vaiheiden välisillä puskurivarastoilla sekä toimitusaikapuskurilla. Kapasiteettipuskuri mahdollistaa tuotannon puskurivarastojen ylläpidon, kun vaihtelevien tilanteiden synnyttämät tilanteet saadaan kirittyä kiinni. Puskurivarastojen avulla saadaan ylläpidettyä kriittisten vaiheiden käyttöastetta ja toimitusaikapuskurien avulla saadaan pelivaraa tuotantoon, kun priorisointisääntöjä voidaan luoda tehokkuus edellä.

6.2 Muutosehdotukset

Tämä työn tuloksena haluan esittää viisi keskeistä muutosehdotusta, joista ensimmäisenä: tuotantoon on varattava tilaa tarvittavalle määrälle puskurivarastoja. Ilman erillistä

panostusta ja suunnittelua tila ei tule riittämään tai harkitsematon sijoittelu tuottaa enemmän haittaa kuin hyötyä. Erityisesti puskurivarasto yksi ja puskurivarasto kolme vaativat paljon lattiapinta-alaa ja olisi tärkeää miettiä, miten puskurit toteutetaan neliötehokkaasti sekä käytännöllisesti. Lisäksi tuotteiden laadun säilyminen puskurivarastoinnissa tulee suunnitella.

Toinen ehdotus on muodostaa vain yksi merkittävä pullonkaula. Tuotannossa on nyt ajoittain vaihtuva ja liikkuva pullonkaula, minkä takia tuotannonohjaus on haastavampaa ja ilmiö toistuu kaikissa skenaarioissa. Ehdotan vähintään yhden käämikoneen hankintaa nykyisten hankintojen lisäksi ja ehdotan lähettämön KET-rajoituksen nostamista eli toisin sanoen lattiapinta-alan kasvattamista, jolloin pullonkaula siirtyy linjalla 1 kerosiinille ja linjalla 2 kokoonpanoon ja tuotanto on täten helpommin seurattavissa, kun voidaan keskittyä yhden pisteen kuormituksen optimointiin TOC-teorian mukaan. Tilapäinen ylkapasiteetti muodostaa myös kapasiteettipuskuria, joka auttaa selviämään yllättävistä tilanteista.

Kolmas ehdotus on keskittää resurssit tuottavuuden parannushankkeissa käämintään ja lähetyspäähän, sillä käämintä sekä lähetyspää muodostavat ajoittain pullonkaulaa ja molemmat vaiheet ovat tilankäytöllisesti haastavia resursseja lisättäväksi sekä rajoittavat kolmannen pullonkaulan eli kokoonpanon toimintaa. Tämä tukee myös toista ehdotusta muodostaa vain yksi merkittävä pullonkaula, jonka toimintaa optimoidaan.

Neljäs ehdotus liittyy läpimenoaikojen yhtenäistämiseen erilaisin keinoin. Analyysin perusteella tuoteperheiden sisällä olisi järkevää toisinaan pitkittää joidenkin lyhyiden töiden läpimenoaikaa siirtämällä resursseja pitkäkestoiselle työlle. Läpimenoaikojen yhtenäistämisen toimet olisivat erityisen tärkeitä Industrial- ja MPT-tuoteperheissä. Toinen keino on oppia tunnistamaan ja jaottelemaan tuotteita paremmin myyntivaiheessa niin, että ne vastaavat läpimenoajaltaan toisiaan. Kolmantena keinona on työjonon rytmitys, jossa lyhyitä ja pitkiä töitä tasataan työjonoon.

Viides huomio ja ehdotus liittyy priorisointiin ja jonojärjestyksen hallintaan. Tuotanto sisältää jokaisessa skenaariossa jonkin verran vaihtelua ja suunniteltu tuotantojärjestys ei toteudu missään skenaariossa täysin. Olisi syytä harkita tuoteperhekohtaista toimituspuskuria CPM-metodin mukaan. Tuotteiden vaiheittainen seuraaminen ja priorisointi aiheuttaa haasteita ja kokonaisuuden kannalta epäedukkaita tilanteita. Olisi järkevää muodostaa toimitusaikapuskuri tuotannon loppuun, joka antaisi tehtaalle mahdollisuuden toimia tehokkaammin, kun tuotantoa voidaan suunnitella tehokkuus edellä eivätkä yksittäiset järjestysmuutokset aiheuta heti ongelmia toimitusaikataulussa.

6.3 Jatkotutkimuskohteet

Tämän tutkimuksen jatkoksi haluaisin ehdottaa seuraavia jatkotutkimuskohteita kahdessa kategoriassa. Ensimmäisenä Hitachi Energy Oy:lle ehdotetut jatkotutkimuskohteet, jonka jälkeen yleiset jatkotutkimuskohteet.

Hitachi Energy Oy:n näkökulmasta luontevia jatkotutkimuskohteita olisivatkin ainakin seuraavat:

- 2D- ja 3D-simuloinnin hyödyntäminen layout-suunnittelussa. Jatkotutkimuksissa voitaisiin nyt keskittyä tarkemmin johonkin tiettyyn osa-alueeseen, kun yleiskuva on rakennettu ja tehtaan konsepti selvillä. Hyviä tutkimusaiheita 2D- ja 3D-simuloinneille olisivat ainakin osastokohtaiset ja yksityiskohtaiset layoutit, silta- ja puominosturien käyttö, trukkiliikenteen ja materiaalivirtojen kulku sekä onnettomuus- ja hätätilanteiden simulointi.
- Simulaatiomallin/virtuaalisen kaksosen hyödyntäminen tuotannonohjauksessa. Virtuaalisen kaksosen rakentaminen ja ylläpito voisi olla merkittävä keino sopeuttaa kysyntätilanteiden vaihteluun, kun erilaisia myyntiskenaarioita voitaisiin koeajaa tehtaan läpi ennen myyntiä.

- Tuottavuuden parantaminen on tehtaan keskeinen tavoite ja tämä tutkimus osoitti tuottavuuden parantamisen parhaaksi keinoksi lisätä liikevaihtoa simuloitun järjestelmän puitteissa. Esimerkiksi teknologian ja tekoälyn hyödyntäminen työntekijöiden tuottavuuden parantamisessa tai tuottavuuden mittaamisen vaikutukset tehokkuuteen voisivat olla kiinnostavia tutkimuskohteita.
- Simulaation hyödyntäminen ETO-tuotannon kokonaisvaihtelun hallinnassa. ETO-tuotannossa esiintyy kolmea vaihtelun tyyppiä: asiakkaan aiheuttama vaihtelu, suunnittelun aiheuttama vaihtelu ja tuotantojärjestelmän aiheuttama vaihtelu. Tämä tutkimus antoi vastauksia pääasiassa vain tuotantojärjestelmää koskien.

Yleiset jatkotutkimusehdotukset liittyvät tutkimuksen aikana heränneisiin mielenkiinnon kohteisiin.

- Tekoälyn hyödyntäminen simulaatio-ohjelmistoissa. Simulaatio-ohjelmiston rakentaminen on edelleen korkean osaamistason työtä, joka vaatii erityistä ammattitaitoa. Olisi kiinnostavaa tutkia tekoälyn hyödyntämistä mallien rakentamisessa, jolloin simulaatiomallien käyttö avautuisi laajemmalle käyttäjäkunnalle.
- Koneoppimisen hyödyntäminen simulaatiossa ja tuotannosuunnittelussa. Simulaation mallinnuksen jälkeen simulointien läpiajaminen ja erilaisten optimi-asetusten löytäminen eri näkökulmista on aikaa vievä prosessi ja vaatii mallinnettavasta kohteesta riippuen jopa tuhansia erilaisia asetelmia. Olisikin hyvä tutkia, voisiko koneoppimista hyödyntämällä löytää tehokkaasti ja nopeasti optimiratkaisuja.
- Reaaliaikainen simuloinnin hyödyntäminen päätöksenteon tukena. Integroimalla reaaliaikaista dataan esimerkiksi IoT-sensoreiden avulla voitaisiin parantaa tilannekuvaa tuotannosta ja siirtyä dynaamiseen eli tilannekohtaisempaan päätöksentekoon.

Lähteet

- ABB. (1998). Muuntajatekninen peruskoulutus. *Koulutusmateriaali* [Rajattu pääsy].
- ABB. (2007). *Muuntajatekniikan perusteet*. [Rajattu pääsy].
- Bertrand, J. W. M., & Muntslag, D. R. (1993). *Production control in engineer-to-order firms* [PDF-tiedosto]. Eindhoven University of Technology. Noudettu 18.7.2025 osoitteesta <https://pure.tue.nl/ws/files/2990562/588922.pdf>
- Delfoi Consulting. (n.d.). *FlexSim-simulointijärjestelmä*. Noudettu 21.07.2025 osoitteesta <https://delfoiconsulting.com/fi/palvelut/toimintamallien-ja-prosessien-simulointi/flexsim-simulointijarjestelma/>
- FlexSim Software Products, Inc. (2025). *Welcome to FlexSim* [Verkkodokumentaatio]. Noudettu 21.7.2025 osoitteesta <https://docs.flexsim.com/en/25.2/Introduction/Welcome/Welcome.html>
- Gosling, J., & Naim, M. M. (2009). Engineering-to-order supply chain management: A literature review. *International Journal of Production Economics*, 741–754. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.07.002>
- Greenwood, A. G. (2025). *FlexSim software primer* (5th ed.). FlexSim Software Products, Inc. [E-kirja]. https://www.flexsim.com/wp-content/uploads/2025/03/FlexSim-Software-Primer_5th-ed.pdf
- Haverila, M., Uusi-Rauva, E., Kouri, I. & Miettinen, A. (2009). *Teollisuustalous*. (6th ed.). Tammer-paino Oy.
- Hicks, C. (2000). Production control in engineer-to-order firms. *Journal of Materials Processing Technology*, 371–381. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(99\)00026-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(99)00026-2)

Hitachi Energy. (2018). *Muuntajatehtaan työhjeet* [Rajattu pääsy].

Hitachi Energy. (2023). *Maa- ja aluetiedot*. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://www.hitachienergy.com/about-us/company-profile/country-and-regional-information/finland>

Hitachi Energy. (2024) *News & Events*. Noudettu 28.07.2025 osoitteesta <https://urly.fi/3TIR>

Hitachi Energy. (2025). *Muuntajatehtaan tuotantokortti* [Rajattu pääsy].

Hitachi Energy. (2025). *Products and solutions: Power Transformers*. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/transformers/power-transformers>

Hopp, W.J. ja Spearman, M. L. (2011). *Factory physics* (3rd ed.). Waveland.

Karrus, K. (2001). *Logistiikka*. (3.painos). WSOY

Law, A. M. (2003). How to conduct a successful simulation study. *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, 66–70. Noudettu 18.7.2025 osoitteesta <https://www.informs-sim.org/wsc03papers/009.pdf>

Law, A. M. (2009). How to build valid and credible simulation models. *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 24–33. Noudettu 18.7.2025 osoitteesta <https://www.informs-sim.org/wsc09papers/003.pdf>

Logistiikan Maailma (2025). *Tuotantomuodot: tilauksen kohdennuspiste (OPP)*. [verkkodokumentti]. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://www.logistiikanmaailma.fi/tuotanto/tilauksen-kohdennuspiste-opp/>

Läärä, E. (2011). *Tilastotieteenperusteet luvut 3–5*. [PDF-tiedosto]. Oulun yliopisto, matemaattisten tieteiden laitos. Noudettu 18.07.2025 math.oulu.fi/materiaalit/luentorungot/TilastotieteenPerusteet_kevat2011_luennot_luvut3-5.pdf

MAOL. (2016). *MAOL-taulukot*. Otava.

Mathew, N. ja Johansson, B. (2023). Production planning and scheduling challenges in the engineer-to-order manufacturing segment. A Literature Study. *International Journal of Innovation, Management and Technology*. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta https://www.ijimt.org/vol14/IJIMT-V14N3-942.pdf?utm_source.com

Matikkamatsku. (2018). *Normaalijakauma* [video]. Youtube https://www.youtube.com/watch?v=mQTVqqa_Oag&t=1s&ab_channel=MATIKKAMATSKUT

Miettinen, P. (1993). *Tuotannonohjaus ja logistiikka*. Painatuskeskus Oy

Munro, R. A, Ramu, G. ja Zrymiak, D.J. (2015). *The Certified Six Sigma Green Belt Handbook*. (2nd ed.). ASQ Quality Press.

Muther, R., & Hales, L. (2015). *Systematic layout planning* (4th ed.). Management & Industrial Research Publications.

Nokelainen, P. (2014). *Luento 2: Tilastollisen tutkimuksen peruskäsitteet ja menetelmät* [PowerPoint-esitys]. Tampereen yliopisto, Kasvatustieteiden yksikkö. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://www.slideserve.com/chaz/luento-2-tilastollisen-tutkimuksen-perusk-sitteet-ja-menetelm-t>

Nordmeyer, B. (n.d.). *Throughput Time vs. Lead Time*. [verkkosivu]. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://smallbusiness.chron.com/throughput-time-vs-lead-time-81687.html>

Pankkiasiat.fi (n.d). *Normaalijakauma*. [verkkosivu] Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://pankkiasiat.fi/normaalijakauma>

Robinson, S. (2011). *Simulation model verification and validation in the modelling process* [Verkkokuva]. Noudettu 21.7.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/figure/Simulation-Model-Verification-and-Validation-in-the-Modelling-Process_fig1_3724832

Robinson, S. (2014). *Simulation: The practice of model development and use* (2nd ed.) [E-kirja]. <https://urly.fi/3TIW>

Saari, S. (2006). *Tuottavuus: teoria ja mittaaminen liiketoiminnassa: tuottavuudenkäsikirja*. Dark Oy

Salomão, A. (2023). *Ensisijainen tutkimus vs. toissijainen tutkimus: Vertaileva analyysi*. Mind the Graph. Noudettu 21.07.2025 osoitteesta <https://mindthegraph.com/blog/fi/what-is-deductive-reasoning-copy/>

Salomão, A. (2023). *Induktiivinen vs. deduktiivinen tutkimus*. Mind the Graph. Noudettu 21.07.2025 osoitteesta <https://mindthegraph.com/blog/fi/induktiivinen-vs-deduktiivinen-tutkimus/>

Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2007). *Research methods for business students* (4th ed.). Pearson Education.

SigSigma. (n.d). *Esteiden teoria (TOC)*. [verkkodokumentti]. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://sixsigma.fi/esteiden-teoria-toc/>

Six Sigma. (n.d.). *Littlen laki*. [verkkodokumentti]. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://sixsigma.fi/littlen-laki/>

SixSigma.fi. (n.d.). *Leanin historia*. [verkkodokumentti]. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://sixsigma.fi/leanin-historia/>

SixSigma.us (2024). *Constant Work in Progress (CONWIP)*. [verkkodokumentti]. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://www.6sigma.us/six-sigma-in-fo-cus/constant-work-in-progress-conwip/>

Stephens, M. P. (2019). *Manufacturing facilities design & material handling* (6th ed.) [E-kirja]. <https://triton.fina.fi/Record/nelli07.4100000008153909?sid=5104389121>

Taulukot.com. (n.d.). *Algebra: Keskiarvo*. [verkkodokumentti] Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://www.taulukot.com/matematiikka/algebra/#keskiarvo>

Techt, U. (2015). *Goldratt and the theory of constraints: The quantum leap in management* [E-kirja]. Ibidem Press. <https://triton.fina.fi/Record/nelli07.3710000000418195?sid=5093701120>

Toshev, R (2025). *TUTA 3250 Simulation Lecture 1 2025* [PowerPoint-esitys]. University of Vaasa, School of Technology and Innovations.

Törmälehto, H.O. (n.d.). *Parametrien edellytykset* [PDF-tiedosto] Helsingin yliopisto. Noudettu 18.07.2025 osoitteesta <https://www.mv.helsinki.fi/home/hotulain/Parametrian%20edellytykset.pdf>

Vivekananthamoorthy, N., & Sankar, S. (n.d.). *Lean Six Sigma*. KCG College of Technology Noudettu 18.07.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/215576248_Lean_Six_Sigma

Vuori, J. (n.d.). *Tapaustutkimus*. Tietoarkisto. Noudettu 21.07.2025 osoitteesta <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/tutkimusasetelma/tapaustutkimus/>

Wilson, J. (2014). *Essentials of business research: A guide to doing your research project* (2nd ed.). SAGE

Liitteet

Liite 1. Simulaatiosuunnitelma (salattu Word-tiedosto)

Liite 2. Simulaatiodokumentaatio ja -tulokset (salattu Excel-tiedosto)

Liite 3. Kirjallinen raportti ja analyysi (salattu Powerpoint-tiedosto)