

Aalto-yliopisto
Perustieteiden korkeakoulu
Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma

Imuohjautuva tuotantosysteemi epävarman kysynnän vallitessa

Diplomityö
17.12.2015

Joona Kaivosoja

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla.
Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

AALTO-YLIOPISTO PERUSTIETEIDEN KORKEAKOULU PL 11000, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Joonas Kaivosoja			
Työn nimi: Imuohjautuva tuotantosysteemi epävarman kysynnän vallitessa			
Title in English: A pull controlled manufacturing system with uncertain demand			
Tutkinto-ohjelma: Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma			
Pääaine: Systeemi- ja operaatiotutkimus		Sivuaaine: Strateginen johtaminen	
Opetusyksikön koodi: Mat-2			
Työn valvoja: Professori Ahti Salo		Työn ohjaaja: DI Teemu Syrjänen	
<p>Toimitussysteemien on joustettava asiakaskysynnän muuttuessa. Yksi tapa lisätä joustavuutta on käyttää systeemissä imuohjausta. Imuohjatussa systeemissä tuotteiden valmistusta ohjataan toteutuneen asiakaskysynnän mukaan kysyntäennusteiden sijaan. Kysyntäennusteita käytetään sen sijaan strategisen päätöksenteon tukena esimerkiksi tuotantosysteemin kokonaiskapasiteettiin, varastotasotavoitteisiin tai tuoteportfolioon vaikuttavissa päätöksissä. Samalla päivittävät tuotantopäätökset voidaan tehdä toteutuneen asiakaskysynnän mukaan.</p> <p>Työn tavoitteena on tutkia lääkevalmistusprosessin edellytyksiä toimia imuohjatuksi erilaisilla ohjauspolitiikoilla. Tutkitun valmistusympäristön ominaisuuksia ovat (i) tuotejärjestyksen mukaan pitkistä lyhyeen vaihtelevat asetusajat, mikä nykyisellä kysyntätasolla johtaa melko pitkään valmistussarjoihin, (ii) suuri määrä erilaisia tuotteita, sekä (iii) tuotekysynnän heikko ennustettavuus. Tutkittavat ohjauspolitiikat ovat yhdistelmiä erilaisista aikataulutuskasojen pituuksista ja tuotantoputkien minimivalmistussarjoista.</p> <p>Työssä rakennetaan monivaiheisesta tuotantoympäristöstä diskreetti tapahtumasimulointimalli, jonka avulla tarkastellaan tuotantosysteemin toimitusaikoja ja kuormitusta satunnaisella asiakaskysynnällä. Tuotannon ohjauksessa hyödynnetään rytmityspyörä (rhythm wheel) -konseptia. Eräkohtaisista toimitusajoista lasketaan kertymäfunktiot sille, millaisilla lopputuotevarastoilla toimitukset olisi voitu toimittaa asiakkaiden toimitusaikavaatimusten mukaisesti. Ohjauspolitiikkoja vertaillaan laskemalla stokastisia dominansseja varastotarpeiden kertymäfunktioista.</p> <p>Simulointitulosten perusteella osaa tuotteista voitaisiin valituilla ohjauksilla valmistaa imuohjautuvasti ilman varmuusvarastoja priorisoimalla niitä tuotannon aikataulutuksessa. Priorisoiduiksi tuotteiksi olisi kannattavinta valita sekä volyymitään että arvoltaan suurimmat tuotteet, jolloin varastojen arvon pieneneminen maksimoidaan. Kaikkia tuotteita ei tulosten perusteella voida valmistaa ilman varmuusvarastoja. Vaikka tuotantosysteemin kapasiteetti olisi ohjauksilla keskimäärin riittävä kaikille tuotteille, kysyntäpiikkejä ei pystytty täyttämään tuotannolla, vaan niiden tasaamiseen olisi tarvittu varmuusvarastoja.</p> <p>Työn tulosten perusteella voidaan suunnitella hallittuja kokeiluja yksittäisten tuotteiden valmistamisesta imuohjatuksi. Lisäksi työssä rakennettua simulointimallia voidaan jatkossa käyttää apuna tuotantosysteemin muutosten, kuten tuoteportfolioon laajenemisen, asetusajojen lyhentämisen, tai konekapasiteetin kasvattamisen, vaikutusten arvioinnissa.</p>			
Päivämäärä: 17.12.2015		Kieli: Suomi	Sivumäärä: 66
Avainsanat: tuotannonohjaus, diskreetti tapahtumasimulointi, stokastinen dominanssi, imuohjaus, tilauksesta valmistaminen			

AALTO UNIVERSITY SCHOOL OF SCIENCE PL 11000, 00076 Aalto http://www.aalto.fi		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Joonas Kaivosoja			
Title: A pull controlled manufacturing system with uncertain demand			
Title in Finnish: Imuohjautuva tuotantosysteemi epävarman kysynnän vallitessa			
Degree Programme: Teknillisen fysiikan ja matematiikan tutkinto-ohjelma			
Major subject: Systems and Operations Research		Minor subject: Strategic Management	
Chair code: Mat-2			
Supervisor: Professor Ahti Salo		Instructor: M.Sc. Teemu Syrjänen	
<p>Supply chains must be able to react to changes in customer demand. One way of inserting flexibility in manufacturing systems is to make use of pull control. In pull controlled systems manufacturing of goods is driven by the realised customer demand instead of sales forecasts while the forecasts are utilised in a more strategic context. The sales forecasts act as decision support tool in for example capacity, inventory level, and product portfolio management. However, the day to day manufacturing decisions are based on the actual customer demand.</p> <p>The aim of the thesis is to study the prerequisites for a pharmaceutical manufacturing system to operate under different pull control policies. The key features of the studied manufacturing system include: (i) sequence-dependent setup times that vary from very long to short setups, which currently leads to long production campaigns, (ii) a huge number of end products, and (iii) poorly forecastable customer demand. The different pull control policies studied are combinations of scheduling periods and minimum campaign quantities of different lengths and sizes.</p> <p>A discrete event simulation model is constructed of the multi-phase manufacturing system. The simulation model is used to study both batch lead times and machine utilisation under random customer demand. Rhythm wheel concept is utilised in scheduling production in the simulations. Based on the realised batch lead times and customer lead time requirements cumulative distribution functions (CDF) are calculated for the number of stocked batches required for on-time deliveries. Different control policies are then compared by calculating stochastic dominances.</p> <p>Based on the simulation results a selection of the products could be produced using pull control without safety stocks if the selected products were prioritised in production scheduling. To maximise the reduction of inventory value, products with high volume and high inventory value should be prioritised. However, not all products can be produced with high service level and no safety stocks.</p> <p>Findings of the thesis can be utilised in designing experiments in pull control in the manufacturing system. In addition, the simulation model can be used as a decision support tool to assess the impacts of changes, such as expanding product portfolio, reducing setup times, or increasing machine capacity, in the manufacturing system.</p>			
Date: 17.12.2015	Language: Finnish	Number of pages: 66	
Keywords: manufacturing control, discrete event simulation, stochastic dominance, pull control, make to order (MTO)			

Esipuhe

Tuotantosysteemin simulointimallin kehittäminen alkoi erikoistyön nimikkeellä keväällä 2015. Kevään kuluessa vahvistui kuitenkin ajatus siitä, ettei aiheesta koskaan valmistuisi erikoistyötä. Tuloksia ja Matlab-koodia oli kassassa melkoisesti, ja mielenkiintoinen aihe päätettiin laajentaa kokonaiseksi diplomityöksi.

Suuri kiitos työn ohjanneelle DI Teemu Syrjäselle, joka mahdollisti työn joustavan tekemisen. Kiitos avartavista keskusteluista, ohjauksesta oleellisen äärelle, ja työn puitteiden järjestelämisestä.

Kiitos valvojalle professori Ahti Salolle kaikesta korvaamattomasta tuesta kiereidenkin keskellä. Kiitos erityisesti avusta työn rajauksessa sekä yksityiskohdaisista kommentteista työn hiomiseksi. Kiitos myös koko Systeemanalyysin laboratorion henkilökunnalle mielenkiintoisten kurssien sekä vierailijaluentojen järjestämisestä.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta ja innostuksesta opiskelujeni aikana. Reissut, harrastukset, ja opiskelijan arki eivät olisi olleet mitään ilman teitä. Kiitos Tuulalle ymmärryksestä ja välittämisestä myös silloin, kun diplomityö tai jokin muu projekti ohitti kaiken muun.

Espoossa, 17.12.2015
Joonas Kaivosoja

Lyhenteet

API	Lääkkeen vaikuttava ainesosa (Active Pharmaceutical Ingredient)
BRW	Tuotteiden kysynnän mukaan joustava rytmituspyörä (Breathing Rhythm Wheel)
CRW	Perinteinen jäykkä rytmituspyörä (Classic Rhythm Wheel)
DES	Diskreetti tapahtumasimulointi (Discrete Event Simulation)
EMS	Ihmislähtöinen johtamisjärjestelmä, osa OPEX-mallia (Effective Management System)
FDA	Yhdysvaltojen lääke- ja elintarvikeviranomainen (The Food and Drug Administration)
Fimea	Lääkealan turvallisuus- ja kehittämiskeskus (The Finnish Medicines Agency)
GMP	Lääkkeiden hyvät tuotantotavat (Good Manufacturing Practice)
HRW	Tuotteiden kysynnän mukaan joustava rytmituspyörä, jossa kaikkia tuotteita ei valmisteta jokaisessa jaksossa (High-Mix Rhythm Wheel)
JIT	Juuri oikeaan tarpeeseen, osa OPEX-mallia (Just In Time)
Lean	Tuotantofilosofia, joka pyrkii prosessien hukkan minimoimiseen
MMQ	Minimivalmistuskoko (Minimum Make Quantity)
MRP	Materiaalien tarvelaskenta (Material Requirements Planning)
MTO	Tilauksesta valmistaminen (Make to Order)
OPEX	Lean-mallin mukainen tavoitetila lääketeollisuudessa (Operational Excellence)
SMED	Lean-työkalu asetusajojen vähentämiseen (Single-Minute Exchange of Die)
TPM	Kokonaisvaltainen kunnossapitofilosofia, osa OPEX-mallia (Total Productive Maintenance)
TQM	Kokonaisvaltainen laatufileosofia, osa OPEX-mallia (Total Quality Management)
WHO	Maailman terveysjärjestö (World Health Organisation)

Merkinnät

$F_X(n)$	Satunnaismuuttujan X kertymäfunktio F arvolla n
$X >_{s_1} Y$	Satunnaismuuttuja X dominoi satunnaismuuttujaa Y ensimmäisen asteen stokastisen dominanssin mielessä
$X >_{s_2} Y$	Satunnaismuuttuja X dominoi satunnaismuuttujaa Y toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä
λ_i	Tuotteen i kysynnän Poisson-prosessin intensiteetti
X_1	Minimisarjapituus tuotantoputkessa 1
X_2	Minimisarjapituus tuotantoputkessa 2
Y	Aikataulusjakson pituus
$(X_1 \times X_2, Y)$	Minimisarjapituuksien ja aikataulusjakson pituuden määrittämä ohjauspolitiikka

Sisältö

Esipuhe	iii
Lyhenteet	iv
Merkinnät	v
1 Johdanto	1
2 Valmistava lääketeollisuus	4
2.1 Lääkevalmistus ja hyvät valmistustavat	4
2.2 Läketeollisuus alana	5
2.3 OPEX ja Lean-valmistus	9
3 Teoreettinen tausta ja aiempi tutkimus	13
3.1 Satunnaisen kysynnän mallintaminen	13
3.2 Simulaatiot ja optimointi	14
3.3 Stokastinen dominanssi	18
3.4 Imuohjaus ja tilauksesta valmistaminen	23
3.5 Syklinen aikataulutus	23
4 Tutkimusongelma ja -menetelmät	29
4.1 Tuotantosysteemin määrittely	29
4.2 Tutkimusongelman määrittely	32
4.3 Menetelmät	34
5 Tulokset	40
5.1 Kapasiteettitarkastelu	40
5.2 Varastokysyntöjen tarkastelu	47
5.3 Erämääräperusteiset jaksot	57
6 Tarkastelu ja johtopäätökset	59
Viitteet	64

1 Johdanto

Teolliselta tuotannolta vaaditaan yhä lyhyempiä toimitusaikoja, laajempia ja yksilöidympiä tuoteportfolioita sekä varmempaa tuotteiden saatavuutta. Tässä ympäristössä monet yritykset pyrkivät toteuttamaan tuotannonsaan lean-periaatteita varastokustannusten hillitsemiseksi. Tuotannon tehokas suunnittelu ja ohjaus ovatkin välttämättömiä pitkäaikaisen selviytymisen takaamiseksi. (Musselman et al., 2002)

Materiaalien tarvelaskentaan (Material Requirements Planning, MRP) pohjautuvat tuotannonohjausjärjestelmät ovat kehittyneet ja kasvattaneet suosiotaan 1960-luvulta lähtien. Nykyisin monien yritysten tuotannonsuunnittelu perustuukin pohjimmiltaan MRP-periaatteisiin. Näiden periaatteiden mukaisesti järjestelmä ohjaa tuotantoa tuotenimikkeiden varastosaldojen, toimitusaika-arvioiden, määriteltyjen varmuusvarastotasojen sekä myyntiennusteiden perusteella. Kun tuotteen varastosaldo saavuttaa - tai sen odotetaan ennusteiden perusteella saavuttavan - varmuusvaran tason, järjestelmä luo automaattisesti ennaltamääritellyn kokaisen tuotantoerätilauksen. MRP:n heikkous on sen riippuvuus myyntiennusteista ja pyrkimys olla tasaamatta kysyntähuippuja varmuusvarastoja hyödyntäen. Pahimmillaan yksittäinen kysyntäennusteen piikki saattaa aiheuttaa paljon ylimääräistä aikataulutusta ja suunnittelutyötä. (Packowski, 2013)

Toimitusketjujen globalisoituminen, hajautuminen ja toimijoiden lisääntyvät kytkökset ovat vahvoja trendejä, jotka lisäävät kompleksisuutta ja epävarmuutta toimitusketjuissa. Näistä trendeistä aiheutuva jatkuva volatilitteetti, epävarmuus, kompleksisuus ja epäselvyys ovat haasteita, joihin kehittyvien toiminnanohjausmenetelmien tulee pystyä vastaamaan. Yritysten markkinaodotusten ja asiakkaiden todellisten tarpeiden välisestä eroista syntyvä volatilitteetti vaatii joustavia prosesseja ja päätöksentekoa. Koska asiakkaat vaativat yhä yksilöidympiä tuotteita, lyhyempiä toimitusaikoja, korkeampaa palvelutasoa sekä pienempiä tilauskokoja, on tuotannon yksityiskohtainen suunnittelu epävarmojen ennusteiden perusteella vaikeaa. Globaalissa toimitusketjussa, ja sen ympäristössä, tapahtuu nopeita ja ennalta-arvaamattomia muutoksia, mikä lisää epävarmuutta toimitusketjun eri osissa. Aiempiin suunnitelmiin ei voida luottaa ja päätöksiä joudutaan tekemään arvausten ja historiatiedosta tehtyjen ekstrapolaatioiden perusteella. Maantieteellisesti ja kulttuurillisesti hajautuneet, monivaiheiset, ja itsenäisistä toimijoista koostuvat

tuotanto- ja jakeluketjut ovat kompleksimpia kuin aiemmin. Kokonaisuuden hallinta ja toimijoiden kokonaisvaltainen koordinointi on tässä ympäristössä erittäin haastavaa. Organisaatioiden väliset rajapinnat ja vastuut saattavat olla epäselviä ja prosessit huonosti yhteensopivia. Lisäksi jokaisella ketjun osalla on omat yksilölliset tavoitteensa, jotka eivät useinkaan tue toisiaan. (Packowski, 2013)

Tällaisessa toimintaympäristössä perinteiset suunnitteluperiaatteet eivät toimi kunnolla. Kokemukset ovat osoittaneet, että yritykset parantaa ennusteiden laatua merkittävästi tuotenimiketasolla ovat tyypillisesti epäonnistuneet. Tarkempien ennusteiden sijaan yritysten kannattaisikin kehittää tarkoista myyntiennusteista riippumattomia tuotantosysteemejä, hyväksyä kysyntään liittyvä epävarmuus ja korostaa joustavuuden merkitystä.

Yksi tapa joustavamman toimitusketjun luomiseksi on lisätä asiakas- eli imuohjautuvuutta tuotannonohjauksessa sekä hyödyntää ennusteita taktisen yksityiskohtaisen suunnittelun sijasta tuotannon raameja määrittelevänä strategisena tietolähteenä. Kokemusten mukaan ennusteiden laatu paranee mitä yleisempiä (yksi vs. useampia tuotenimikkeitä) ja mitä pidemmälle aikavälille (päivän vs. kolmen kuukauden kysyntä) ennuste on laadittu. Yleisiä ennusteita voidaan tällöin käyttää toimitusketjun yleisten parametrien, kuten kokonaiskapasiteetin ja varastotasotavoitteiden, määrittämiseen samalla kun päivittäiset tuotantopäätökset tehdään imuohjautuvasti toteutuneen asiakaskysynnän perusteella. (Packowski, 2013)

Tässä työssä tarkastellaan erään kemianteollisuuden valmistusprosessin edellytyksiä soveltaa tuotantoputkiajattelua ja imuohjautuvaa syklistä aikataulutusta tuotannossaan. Tutkitun valmistusympäristön määritteleviä ominaisuuksia ovat (i) tuotejärjestyksen mukaan pitkistä lyhyeen vaihtelevat asetusajat valmistuserien välissä, mikä nykyisellä kysyntätasolla johtaa melko pitkiin valmistussarjoihin, (ii) suuri määrä erilaisia tuotteita, sekä (iii) tuotteiden tarkan kysynnän heikko ennustettavuus. Työssä esitetään tuotantoputkien teoriaa ja tehdään perusteltu ehdotus tuotteiden ja tuotantoresursien jaoksi. Imuohjauksen (eli asiakkaiden toteutuneisiin tilauksiin perustuvan tuotantoerien käynnistämisen) edellytyksiä tuotantoympäristössä tarkastellaan toimitusajoista johdettavien varmuusvarastotarpeiden sekä kapasiteetin näkökulmasta.

Työssä tuotteella tarkoitetaan tuotenimikettä, jolle lähtötietona voitiin määrittää sen valmistusprosessin kulku ja parametrit, sekä kysyntäennuste. Erällä tarkoitetaan pienintä yksikköä, jossa tuotteita käsitellään tuotannossa. Tuotekohtaiset eräkoot oletetaan mallissa vakioiksi. Tuotantosarjalla ja sen pituudella viitataan saman tuotteen peräkkäin valmistettaviin eriin ja niiden

määrään. Tuotantosarjassa erien väliset asetusajat ovat yleisesti merkittävästi lyhyempiä kuin eri tuotantosarjojen välillä.

2 Valmistava lääketeollisuus

2.1 Lääkevalmistus ja hyvät valmistustavat

Maaailman terveysjärjestö (World Health Organisation, WHO) määrittelee lääkkeeksi minkä tahansa aineen tai aineiden sekoituksen, jota valmistetaan, myydään, tarjotaan myytäväksi, tai esitetään käytettäväksi sairauden, epänormaalin fyysisen tilan ja näiden oireiden ehkäisyyn, diagnosointiin, tai hoitoon ihmisillä tai eläimillä (Shah, 2004). Lääkkeiden valmistus on erittäin tarkoin säädeltyä kansainvälisesti. Sekä lääkkeiden valmistus että myynti ja jakelu ovat laajalti luvanvaraista toimintaa.

Lääkkeiden hyviä tuotantotapoja ohjaavat WHO:n asettamat yksityiskohtaiset Good Manufacturing Practice (GMP) -periaatteet, joiden pohjalta kansalliset viranomaiset tarkastavat säännöllisesti lääkevalmistajien GMP-tilan (WHO, 2014). GMP:n tavoitteena on minimoida kaikki lääketuotantoon liittyvät riskit, joita ei voida eliminoida lopputuotetta testaamalla. Sen mukaisesti toimimalla lääkkeitä tuotetaan johdonmukaisesti ja testataan laatusandardien mukaisesti. Ohjeistukset kattavat tuotannon kaikki vaiheet: lähtömateriaalit, tuotantotilat, koneet ja työvälineet, koulutukset sekä hygienia (WHO, 2015). WHO julkaisi ensimmäiset GMP-ohjeet jo vuonna 1968, jonka jälkeen ohjeita on useasti päivitetty ja tuotannolle asetettuja vaatimuksia kiristetty (WHO, 2014).

Monet maat ovat luoneet omat GMP ohjeistuksensa WHO:n ohjeiden pohjalta tai yhteistäneet ohjeistuksensa WHO:n ohjeiden mukaisiksi (WHO, 2015). Suomessa lääkelain mukaisesti lääkkeiden valmistus ja tukkukauppa ovat Lääkealan turvallisuus- ja kehittämiskeskuksen (Finnish Medicines Agency, Fimea) luvan varaista toimintaa. Fimean sivustojen mukaan: "Läkelain (395/1897) 8 §:n mukaan lääkkeitä saa valmistaa teollisesti ainoastaan hyväksyttävät tuotantotilat ja laitteet käsittävässä lääketehaassa Lääkealan turvallisuus- ja kehittämiskeskuksen Fimean luvalla". Suomessa tapahtuva lääkevalmistus nojaa lääkelain ja -asetuksen lisäksi EU:n ohjeisiin, sillä: "Toimiluvan myöntämisen ehtona on, että yhtiö täyttää EU:n GMP-ohjeistossa lääketehaalle asetetut vaatimukset". (Fimea, 2015)

GMP:n näkökulma on täysin laatu pohjainen. Ohjeistukset kattavat laajasti valmistuksen prosessista koneisiin, tuotantotiloihin, varastointiin, ja kulje-

tuksiin, mutta ne keskittyvät laatuun tehokkuuden maksimoinnin ja kustannusten minimoinnin sijaan. GMP:ssä laatu on valmistusprosessin sisäänrakennettu ominaisuus, eikä vain lopputuotteista testaamalla rakennettu. Toisaalta GMP:n vaatimus on, että laadunhallinnan tulee olla valmistuksesta täysin erotettu toiminto, jonka vastuulla on raaka-aineiden, välituotteiden, sekä lopputuotteiden testaus ja hyväksyntä. (Chowdary & George, 2012)

2.2 Lääketeollisuus alana

Lääketeollisuus käsittää sekä lääkkeiden kehitykseen että valmistukseen osallistuvat yritykset ja organisaatiot. Teollisuutta kuvaavat erityisesti uusien tuotteiden erittäin pitkät ja kalliit kehitysprosessit, tiukka sääntely mahdollisten terveyshaittojen takia, sekä viime vuosikymmeninä tuotantokapasiteetin keskittäminen. Erilaiset markkinoilla olevat lääkkeet voidaan jakaa karkeasti alkuperäislääkkeisiin ja geneerisiin lääkkeisiin. Alkuperäislääkkeet ovat patenteilla suojattuja lääkkeitä, joita vain patentin omistajalla on oikeus valmistaa. Geneeriset lääkkeet ovat annostukseltaan, käyttötavaltaan, ja laadultaan alkuperäislääkettä vastaavia lääkkeitä, jotka usein tuodaan markkinoille halvempina korvaavina lääkkeinä alkuperäislääkkeen patenttien umpeutuksen (FDA, 2016). Lisäksi myytävät lääkkeet voidaan luokitella reseptilääkkeisiin, joita myydään vain lääkärin määräämää reseptiä vastaan, ja vapaasti myytäviin käsikauppalääkkeisiin.

Shah (2004) jakaa artikkelissaan lääketeollisuuden yritykset viiteen eri ryhmään:

1. Suuret omaan tutkimukseen ja kehitykseen nojaavat ylikansalliset yhtiöt, joiden patentoidut alkuperäislääkkeet ovat globaalisti myynnissä. Näiden yritysten tuotantolaitokset ovat usein hajautuneet useisiin eri kohteisiin.
2. Suuret geneeristen lääkkeiden tuottajat, jotka tuottavat tuotteita, joiden patentit ovat vanhentuneet.
3. Kansalliset tuottajat, jotka tuottavat geneerisiä lääkkeitä, patentoituja alkuperäislääkkeitä sekä lisensoituja tuotteita.
4. Sopimusvalmistajat, joilla ei ole omaa tuoteportfoliota. Sopimusvalmistajat valmistavat ulkoistuspalveluna raaka-aineita, välituotteita, ja lopputuotteita muille yrityksille.

5. Lääkekehitykseen ja biotekniikkaan erikoistuneet, usein start-up vaiheessa olevat, yritykset, joilla ei ole merkittävää omaa tuotantokapasiteettia.

Näistä yrityksistä pääasiassa ryhmän 1 suuret yritykset hallitsevat markkinoita. Näillä yrityksillä on globaaleina toimijoina haastavimmin hallittavat toimitusketjut (Shah, 2004). Globaalien yritysten haasteet liittyvät erityisesti hajautuneen toimitusketjun hallintaan. Kymmenien tehtaiden ja valtavan toimittaja- ja asiakasmäärän hallitseminen eri puolilla maailmaa on kompleksista. Toisaalta ryhmän 3 kansallisilla sekä patentoituja että geneerisiä lääkkeitä valmistavilla yrityksillä on myös omat erityiset haasteensa toimitusketjun hallinnassa. Kansallinen yritys saattaa esimerkiksi valmistaa yhtä montaa erilaista lopputuotetta kuin liikevaihdoiltaan kymmenkertainen globaali, vain patenttilääkkeisiin keskittyvä, yritys. Tällöin kansallisen yrityksen toimitusketju on globaalin yrityksen toimitusketjuun verrattuna kompleksisempi siinä suhteessa, että yhdessä tehtaassa tai tuotantoyksikössä valmistetaan useampia erilaisia tuotteita. Erilaisten tuotteiden suuri määrä tuotantoyksiköissä johtaa usein esimerkiksi pitkiin keskimääriäisiin asetusaikoihin suhteessa tuotantoaikaan sekä vaikeuttaa tuotannon aikataulutusta.

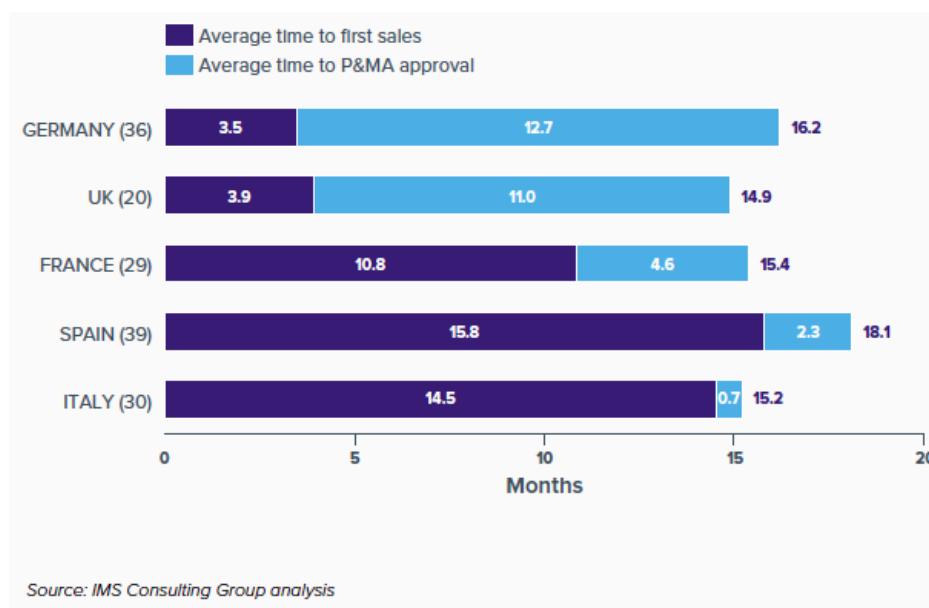
Lääkevalmistuksen toimitusketju jakaantuu Shah (2004) mukaan tyypillisesti viiteen vaiheeseen: (i) vaikuttavan aineen (active pharmaceutical ingredient, API) valmistus, (ii) lopputuotteen valmistus, (iii) varastointi, (iv) toimitus tukkureille, ja (v) toimitus jälleenmyyjille tai sairaaloille. Vaikuttavien aineiden valmistus (i) tapahtuu usein pitkissä kampanjoissa siten, että yksittäistä vaikuttavaa ainetta saatetaan valmistaa kerrallaan jopa vuoden tarpeisiin. Syy pitkiin kampanjoihin on erittäin pitkissä, aiemmin jopa 4 viikon mittaisissa, asetusaajoissa. Eri vaikuttavien aineiden valmistuksen välissä valmistuslaitteisto ja -tila on puhdistettava, puhdistustulos validoitava, ja laitteisto koottava seuraavaa prosessia varten. Lisäksi itse valmistusprosessit ovat pitkiä ja monivaiheisia. Kampanjat täytyy pitää pitkinä, jotta laitteistojen vuosittainen käyttöaste pysyisi kohtuullisena. Valmistusprosessin ominaisuuksien takia API-valmistus ei sovellu ketterään, asiakaskysyntään nopeasti reagoivaan toimintatapaan. Lopputuotteen valmistus (ii) käsittää kaikki tarvittavat vaiheet API:n ja muiden raaka-aineiden muuttamiseksi varastoitaviksi lopputuotteiksi. Lopputuote saattaa olla muodoltaan esimerkiksi pakattu tabletti, ampulli, pullo, tai inhalaattori. Tämän työn simulointimallilla mallinnetaan erästä osaa tässä kuvaillusta lopputuotteen valmistuksesta. Lopputuotevarastot (iii) ovat lääketeollisuudessa tyypillisesti merkittäviä sekä osittain joustamattoman tuotannon, heilahtelevan asiakaskysynnän että korkeiden toimitusvarmuusvaatimusten takia. Lopputuotevarastossa on usein tuotteita 1-6 kuukauden kysyntää vastaava määrä. Varastojen kiertonopeu-

det ovat myös tyypillisesti hitaita, usein välillä 1-8 vuosittaisen myynnin ja keskimääräisen varastotason suhteena mitattuna. Tukkureilla (iv) on Shah (2004) mukaan merkittävä rooli toimitusketjussa. Iso-Britannian kysynnästä 80 % kulkee tukkureiden kautta. Lisäksi tukkurimarkkinat ovat keskittyneitä, kolme suurinta tukkuria kattavat lähes koko markkinan Iso-Britanniassa. (Shah, 2004)

Lääketeollisuus on viime vuosina kokenut merkittäviä muutoksia ja kilpailuympäristö on muuttunut aiempaa haastavammaksi. Aiemmin yritysten strategiana oli sijoittaa suuri osa voitoista eli noin 25 % takaisin tuotekehitykseen ja hyötyä uusien alkuperäislääkkeiden korkeista marginaaleista ja kysynnän hintajoustamattomuudesta. Merkittäviä muutoksia on Shah (2004) artikkelin mukaan tapahtunut seuraavilla alueilla: tuotekehityksen tuottavuus, uusien tuotteiden patenttien efektiivinen suoja-aika, korvaavat lääkkeet, ja kysynnän hintajoustavuus. Aiemmin tuotekehityksen tuottavuus oli hyvä ja kehityksen tuloksena syntyi usein yhdisteitä aiemmin hoitamattomien sairauksien hoitoon. Viime vuosina tuotekehityksen tuottavuus on heikentynyt uusien rekisteröityjen kemiallisten yhdisteiden investointeihin suhteutettussa määrässä mitattuna. Alkuperäislääkkeitä suojaavien patenttien efektiivinen suoja on lyhentynyt, sillä uusien tuotteiden tuominen markkinoille kestää yhä kauemmin tiukempien vaatimusten myötä. Uuden lääkkeen tuominen markkinoille patenttihakemuksen jälkeen kestää keskimäärin 8-12 vuotta. Uuden alkuperäislääkkeen kanssa kilpailevien, lähes yhtenevien, toisten alkuperäislääkkeiden määrä on kasvanut, mikä on lyhentänyt uuden lääkkeen kilpailusta vapaata aikaa noin 5 vuodesta 1-2 vuoteen. Lisäksi terveydenhuollon kustannuspaineiden takia uusilta rekisteröitäviltä lääkkeiltä edellytetään uusia terapia-alueita tai merkittäviä kustannus- ja terveyshyötyjä olemassa oleviin lääkkeisiin verrattuna. Yhdessä nämä tekijät merkitsevät sitä, että uusien lääkkeiden kehittämisestä on tullut aiempaa epävarmempaa sekä kalliimpaa, ja potentiaalisten uusien lääkkeiden on pystyttävä maksamaan kehitystyö takaisin aikaisempaa lyhyemmässä ajassa ja pienemmällä katteella. (Shah, 2004)

IMS Consulting Groupin raportissa Colasante (2015) käsittelee vuoden 2014 uusien lanseerattujen lääkevalmisteiden hinnoittelua ja markkinoille pääsyyn kulunutta aikaa. Raportissa todetaan edelleen kiristyvien terveydenhuolto-
budjettien johtavan entistä tiukempaan lääkkeiden listahintojen sääntelyyn. Uusien lääkkeiden on osoitettava tuovansa merkittäviä etuja jo markkinoilla oleviin lääkkeisiin verrattuna, jotta ne ovat oikeutettuja nykyisiä lääkkeitä korkeampaan listahintaan. Vertailemalla uusien lanseerattujen molekyylien listahintoja vanhempien vertailukelpoisten tuotteiden listahintoihin Yhdysvalloissa ja Euroopassa Colasante (2015) toteaa, että vuonna 2014 merkittä-

vä osuus uusista tuotteista tuli markkinoille markkinoilla jo olevia tuotteita halvemmalla listahinnalla (Euroopassa 25 % ja Yhdysvalloissa 40 % uusista tuotteista). Vaikka raportissa todetaan näiden alennuksella markkinoille tulevien tuotteiden kuuluvan usein terapia-alueille, joilla on jo useita vastaavia lääkkeitä markkinoilla, ovat tilastot osoitus siitä, ettei valmistaja voi automaattisesti olettaa uudeen lääkkeen myyvän nykyisiä vastaavia lääkkeitä korkeampaan hintaan.



Kuva 1: Keskimääräinen aika viranomaisen hyväksynnästä ensimmäiseen myyntiin ja ensimmäisestä mynnistä kansalliseen korvauspäätökseen. (Colasante, 2015)

Listahintojen lisäksi Colasante (2015) tarkastelee Euroopassa ja Yhdysvalloissa aikaa, joka kuluu uuden lääkkeen hyväksynnästä sen ensimmäiseen myyntiin. Erot keskimääräisissä ajoissa otoksen ääripäiden välillä ovat vuonna 2014 valtavat. Tutkituista valtioista lyhin keskimääräinen aika hyväksynnästä ensimmäiseen myyntiin on Yhdysvalloissa (1,9 kuukautta) ja pisin keskimääräinen aika Kreikassa (21,3 kuukautta). Euroopan viittä suurta EU5 valtiota tarkasteltaessa erot kuitenkin tasoittuvat, mikäli markkinoille pääsyn viiveeseen lasketaan ensimmäisen myynnin viiveen lisäksi kansallisen korvauspäätöksen saamiseen kulunut aika. Kuvassa 1 on esitetty raportin tulokset markkinoille pääsyn kokonaisviiveestä Saksan, Iso-Britannian, Ranskan, Espanjan, ja Italian osalta (Colasante, 2015). Kuvasta voidaan nähdä, että kokonaisviive on valtiosta riippumatta noin 16 kuukautta. Pitkä viive uusien lääkkeiden hyväksynnästä niiden tuomiseen täysivaltaisesti markkinoille on

haaste lääkevalmistajille, koska se lyhentää lääkkeiden patenttien efektiivisiä suoja-aikoja. Colasante (2015) toteaa, että pitkät viiveet markkinoille pääsyssä vaikuttavat olevan suoraa seurausta kansallisten hinnoittelusta vastaavien toimijoiden entistä tarkemmasta lääkkeiden hyötyjen tarkastelusta ja budjettipaineista.

2.3 OPEX ja Lean-valmistus

Viranomaisten kiristyvät vaatimukset ja globaalin kilpailun koveneminen asettavat suuria paineita lääkevalmistajille sekä laadun parantamiseen että kustannusten pienentämiseen. Yhdysvaltojen ruoka- ja lääkeviranomaisen (The Food and Drug Administration, FDA) raportoi 309 %:n kasvun lääkkeiden takaisinvedoissa vuodesta 2008 vuoteen 2009 (Friedli et al., 2010). Laatuongelmat vaivaavat nykyisellään tuotantoa sekä halpatuotannon maissa että esimerkiksi Länsi-Euroopassa ja Yhdysvalloissa. Suurin osa takaisinvedoista on johtunut raaka-aineiden huonosta laadusta, tuotteiden väärästä pakkauksesta, sekä tuotteiden pilaantumisesta tai saastumisesta. Historiallisesti toimitusketjuissa on kiinnitetty eniten huomiota uusien lääkkeiden kehittämiseen sekä markkinointiin, eli koko ketjun ääripäihin. Viime aikoina on kuitenkin alettu kiinnittämään yhä enemmän huomiota valmistuksen toimitusketjun optimointiin ja sen kykyyn tuottaa arvoa asiakkaille (Shah, 2004). Lääketeollisuudessa valmistuksen toimitusketjun kehityksestä ja sen Lean-mallin mukaisesta tavoitetilasta käytetään termiä Operational Excellence (OPEX) (Friedli et al., 2010).

Lean-filosofian yhtenä tavoitteena on jatkuva pyrkimys liiketoiminnan prosessien hukkan minimoimiseksi. Hukan poistaminen on yksi tehokkaimmista tavoista minkä tahansa liiketoiminnan kannattavuuden parantamiseksi (Heilala et al., 2008). Tuotteiden ja palveluiden tuotannossa jokainen prosessi joko tuo lisäarvoa asiakkaalle tai luo hukkaa. Hukan poistaminen prosesseista vaatii syvällistä ymmärrystä siitä, mitä hukka kussakin prosessissa on, ja missä osissa prosessia hukkaa ilmenee. Erilaiset hukat luokitellaan perinteisesti Lean-valmistuksessa alla esitetyn seitsemän "synnin" mukaisesti:

1. Ylituotanto
2. Tarpeettomat varastot
3. Ylimääräinen liike
4. Odotus

5. Kuljetus
6. Turha käsittely
7. Virheet

(Heilala et al., 2008)

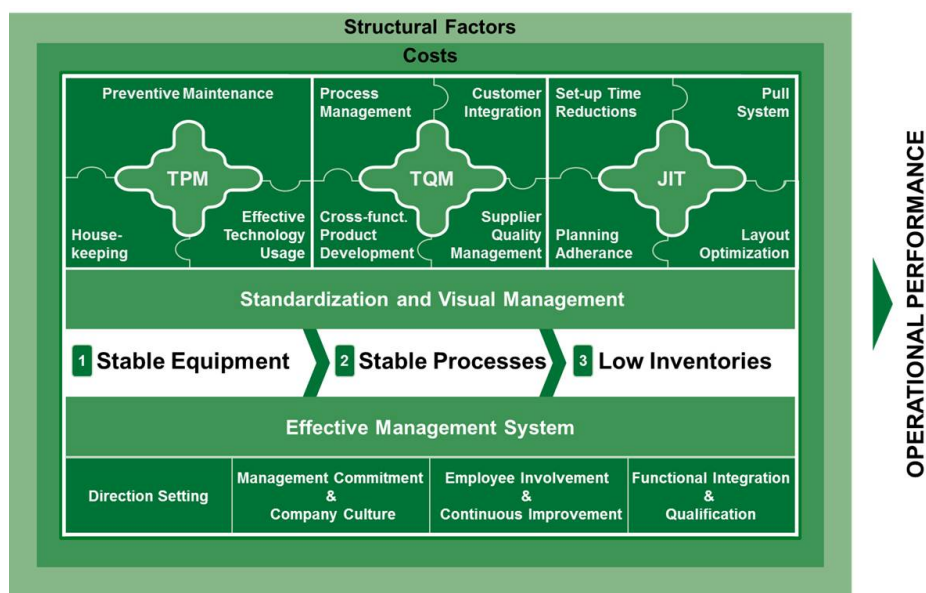
Ylituotanto (1) tarkoittaa tuotteen tuottamista ilman, että asiakas ostaa tuotteen, jolloin koko tuotannon työpanos menee hukkaan. Tarpeettomat varastot (2) taas sitovat yrityksen pääomaa ja hidastavat materiaalien kiertoa. Työntekijöiden tai työvälineiden liikkuttelu (3) ei itsessään tuota asiakkaan kokemaa lisäarvoa, minkä johdosta kaikki ylimääräiset liikkeet tulisi minimoida tuotantosysteemissä. Aika on rajallinen resurssi, jota tuhlaantuu aina, kun ihminen tai kone joutuu odottamaan (4) jotakin voidakseen aloittaa työvaiheensa. Odottamisen sijaan työntekijä tai kone voisi tehdä tuottavaa työtä. Tuotteiden tai raaka-aineiden kuljetuksia (5), jotka eivät suoraan tuota lisäarvoa asiakkaalle tulisi välttää kustannusten ja toimitusajan minimoimiseksi. Turha käsittely (6), kuten esimerkiksi tuotteiden pakkaaminen ja purkaminen useaan kertaan tai asiakkaan kannalta ylimääräisten ominaisuuksien lisääminen tuotteisiin lisää tuotantokustannuksia muttei asiakkaan kokemaa arvoa. Virheet (7) tuotannossa tarkoittavat joko lisätyötä (huomattu virhe korjataan), materiaalin ja työn hukkaa (virheellinen tuote hävitetään), tai asiakkaan kokeman arvon vähenemistä (viallinen tuote toimitetaan asiakkaalle). Lean-valmistuksessa on olennaista laadun rakentaminen sisään tuotantoprosessiin, jotta asiat on mahdollista tehdä oikein ensimmäisellä kerralla.

Friedli et al. (2010) ja Friedli et al. (2013) raportoivat kansainvälisissä benchmark-tutkimuksissaan lääketieteellisuuden OPEX-kehityksen tilaa. Kuvassa 2 on esitetty benchmark-tutkimusten perustana oleva malli, niin kutsuttu St. Gallen -malli, lääketieteellisuuden OPEX-toiminnalle. Mallissa OPEX on jaettu neljään osa-alueeseen: Total Productive Maintenance (TPM), Total Quality Management (TQM), Just-In-Time (JIT), ja Effective Management System (EMS). Näistä kolme ensimmäistä osa-aluetta muodostavat OPEX:in teknisen kokonaisuuden, ja viimeinen osa-alue sosiaalisen kokonaisuuden (Friedli et al., 2013). Tekninen kokonaisuus koostuu sekä laajemmista periaatteista, kuten JIT, että yksittäisistä työkaluista ja tekniikoista, kuten Poka Yoke tai SMED. Total Productive Maintenance (TPM) -periaatteen tarkoituksena on maksimoida tuotantolaitteiden tuottavuus ja minimoida suunnittelemattomat käyttökatkot. Periaatteen mukaisesti laitteiden teknisten ominaisuuksien lisäksi keskitytään mm. ennakoivaan huoltoon ja tuotanto-operaattoreiden osallistamiseen sekä kouluttamiseen laitteiden kunnossapidossa. Total Quality Management (TQM) on kokonaisvaltainen laadunhallintajärjestelmä, jon-

ka tarkoituksena on minimoida prosessien hajontaa. Tilastollisten menetelmien lisäksi TQM painottaa mm. asiakaslähtöisyyttä, johdon sitoutumista laatuprosesseihin, ja jatkuvaa kehitystä. Just-In-Time on tuotantofilosofia, jonka kantava ajatus on minimoida tuotannon hukkaa, kuten ylituotantoa ja varastoja. Tuotteita pyritään tuottamaan juuri oikeaan tarpeeseen käyttäen muun muassa seuraavia keinoja: asetusajkojen lyhentäminen, imuohjaus, ja tilankäytön optimointi. Näitä teknisiä osa-alueita yhdistää St. Gallen OPEX-mallissa Effective Management System (EMS). EMS:ssä tuotannon työntekijät nähdään aktiivisina osallistujina työtapojen ja -menetelmien kehityksessä. Keskeisiä johdon työvälineitä ovat mm. tavoitteen asetanta, palautteen anto, sekä osallistaminen ja jatkuva kehitys. (Friedli et al., 2013)

Tässä työssä keskitytään imuohjaukseen, joka St. Gallen OPEX-mallissa kuuluu JIT-alueen keskeisiin menetelmiin, ja sen edellytyksiin tuotantosysteemisä. Friedli et al. (2013) kyselytutkimuksen mukaan imuohjauksen käyttöön-ottoaste on kasvanut lääkevalmistuksen ohjauksessa vuodesta 2003 vuoteen 2012 jopa 200 %. Imuohjauksen soveltaminen lääkevalmistuksessa on siis hyvin ajankohtainen aihe. Tyypillisesti pitkien toimitusaikojen ja asetusajkojen vuoksi imuohjauksen kokonaisvaltainen soveltaminen lääkevalmistuksessa on haastavaa. Friedli et al. (2010) toteaaakin, etteivät imuohjatut tuotantoprosessit ole vielä yleisiä lääkevalmistuksessa, ja ettei tuotteiden virtaa raaka-aineista lopputuotteiksi voida kuvata tavoitetilan mukaiseksi jatkuvaksi virraksi.

Eri lääketuotemuotojen ominaisuudet vaikuttavat valmistusprosessiin ja sen suunnittelun periaatteisiin, kuten imuohjauksen hyödyntämiseen. Injektio- tuotteet täytyy esimerkiksi valmistaa steriilissä tilassa ja ne pilaantuvat melko nopeasti. Tablettimuotoisten tuotteiden valmistuksessa taas puhtausluokkavaatimukset ovat injektiovalmistusta kevyemmät ja tuotteiden säilyvyys on parempi. Myös asetus- ja valmistusaikojen pituudet vaihtelevat prosessikohtaisesti tuotemuodon ja tuotannon vaiheen mukaan. Lisäksi valmiiden lääke-erien täytyy usein odottaa erilaisten laadunvalvonnan testien valmistamista ennen kuin erä voidaan toimittaa asiakkaalle. Imuohjauksen mahdolliset hyödyt, kuten varaston kierron nopeutuminen ja sitä kautta varastoon pilaantuvien erien väheneminen, sekä edellytykset vaihtelevat siten prosessikohtaisesti lääkevalmistuksessa.



Kuva 2: Friedli et al. (2010) ja (2013) benchmark-tutkimuksissa käyttämä OPEX-malli. Mallissa on esitetty neljä OPEX:in osa-alueita TPM, TQM, JIT, ja EMS, sekä niiden vaikutus toimitusketjun tehokkuuteen. <http://www.opexbenchmarking.com/approach.php> (Viitattu 10.11.2015)

3 Teoreettinen tausta ja aiempi tutkimus

3.1 Satunnaisen kysynnän mallintaminen

Klassisissa tilauspisteperusteisissa varastonhallintamalleissa kysynnän todennäköisyysjakauman ominaisuudet vaikuttavat varaston toimintaan merkittävästi. Monissa lähteissä kysynnän vaihtelua mallinnetaan normaalijakaumalla, kun kokonaiskysynnän oletetaan koostuvan monien yksittäisten riippumattomien asiakkaiden pienistä yhteenlasketuista tilauksista. Normaalijakauma on kuitenkin ongelmallinen jakauma tuotekysynnälle, sillä se on määritelty niin negatiivisille kuin positiivisillekin arvoille ja jakauma on symmetrinen odotusarvonsa suhteen. Ramaekers & Jensen (2008) mukaan normaalijakaumalla voidaan kuitenkin usein approksimoida suurikysyntäisten tuotteiden kysyntää. Artikkelissaan Ramaekers & Jensen käsittelevät mallia, jossa yksittäisen tilauksen koko ja esiintymistiheys on erotettu toisistaan. He toteavat Poisson-jakauman yleisesti käytetyksi tilaustiheyden jakaumaksi ja viittaavat tutkimukseen, jossa yksin Poisson-jakaumalla voitiin onnistuneesti mallintaa pienikysyntäisen tuotteen kysyntää. Poisson-jakaumalla mallinnetun tilaustiheyden yhteydessä tilauskoko voidaan mallintaa mielevaltaisella jakaumalla. Artikkelissa viitataan edellisiin tutkimuksiin, joissa tilauskoko on mallinnettu mm. vakiokoolla ja geometrisella jakaumalla. (Ramaekers & Jensen, 2008)

Asiakastilausten stokastista saapumisprosessia $\{N(t), t \geq 0\}$ voidaan kutsua Poisson-prosessiksi, jos prosessi täyttää seuraavat ehdot:

1. Tilaukset saapuvat yksitellen.
2. Saapumisten määrä $N(t+s) - N(t)$ aikavälillä $(t, t+s]$ on riippumaton saapumisten määrästä $N(u)$ aikaan $0 \leq u \leq t$ mennessä.
3. Saapumisten määrän $N(t+s) - N(t)$ jakauma on riippumaton kaikkina aikoina t parametreista $t, s \geq 0$.

Mikäli $\{N(t), t \geq 0\}$ on Poisson-prosessi, on saapumisten määrä millä tahansa aikavälillä s Poisson-jakautunut satunnaismuuttuja parametrilla λs siten, että saapumisten määrän odotusarvo on λs . (Law, 2007)

Todellisissa systeemeissä näistä ehdoista ensimmäinen toteutuu usein, jollei tilauksia toimiteta erissä. Toinen ehto ei pidä paikkaansa esimerkiksi jos asiakas havainnoidessaan systeemin ruuhkautuneen ei teekään tilausta. Kolmas ehto taas ei ole voimassa, mikäli tilausten keskimääräinen tiheys riippuu ajasta. Esimerkiksi ravintoloiden tilausten tiheys vaihtelee usein viikonpäivän tai kellonajan mukaan. (Law, 2007)

3.2 Simulaatiot ja optimointi

Perinteisiä tuotannonohjausmenetelmiä pitkään käyttäneiden yritysten voi usein olla vaikea sitoutua Lean-menetelmien käyttöön niiden vaatimalla intensiteetillä. Lean-menetelmien täysi käyttöönotto vaatisi niin moninaisten ja ratkaisevien prosessien muuttamista merkittäväällä tavalla, että muutosten vaikutuksia on erittäin vaikea etukäteen arvioida tarkasti. Tällöin johdon päätöksen sitoutua muutokseen tulisi riippua johdon uskoon menetelmien toimivuudesta, muiden yritysten onnistumiskertomuksista, tai yleisistä peukalosäännöistä hyötyjen arvioimisessa. Monille johtajille tämä ei riitä näin ratkaisevan muutoksen perusteeksi. Ennen sitoutumista kalliisiin muutoksiin hyötyjä voidaan kuitenkin arvioida ja havainnollistaa simulointimallien avulla. Simulointimallien avulla voidaan luoda dynaamisia näkymiä esimerkiksi varastotasojen muutoksista, toimitusajoista, sekä koneiden käyttöasteista erilaisilla tuotantoparametreilla. (Abdulmalek & Rajgopal, 2007)

Tietokoneiden kehittyminen on mahdollistanut simulointimenetelmien kehittymisen ja laajan käytön. Viimeisen 60 vuoden aikana simulointitekniikoita on käytetty onnistuneesti hyvin moninaisesti valmistuksen ja liiketoiminnan eri tarpeisiin. Tekniikoita on hyödynnetty muun muassa tuotannon suunnittelussa ja ohjauksessa, strategiatyössä, resurssien hallinnassa, sekä koulutuksissa. Jahangirian et al. (2010) tekemän kirjallisuuskatsauksen mukaan vuosien 1997 ja 2006 välisenä aikana suosituin yksittäinen simulointitekniikka oli diskreettiaikainen tapahtumapohjainen simulointi (Discrete Event Simulation, DES). Kaikista simulointijulkaisujen aiheista suosituin oli aikataulutus. Julkaisuja tehtiin hyvin laajalle skaalalle eri teollisuuden aloja - elektroniikasta energiaan ja logistiikasta uutisten julkaisuun. Aikataulutuksesta DES-menetelmällä tehdyt julkaisut, jotka sisältyivät katsauksen otokseen, liittyivät ensisijaisesti valmistukseen (yleinen, elektroniikka, ja tulostus), sekä logistiikkaan (konttiterminaalit, ja ilmaliikenne). (Jahangirian et al., 2010)

Tietokonesimulaatioilla on yleisesti fysikaalisia malleja helpompi tutkia systeemien ominaisuuksia muuttuneissa ympäristöissä, kuten esimerkiksi tuo-

tantosysteemiä uusilla ohjausperiaatteilla. Niiden avulla voidaan fysikaalisia malleja helpommin tutkia esimerkiksi pitkiä tai todella lyhyitä aikajaksoja. Tietokonesimulaatiolla voidaan arvioida esimerkiksi varastojen arvon kehitystä useamman vuoden aikajaksolla tai elektronisen systeemin toimintaa yhden sekunnin aikajaksolla. Simulaatioilla voidaan lisäksi mallintaa todellisia systeemejä, jotka ovat liian komplekseja mallinnettavaksi analyttisesti ratkaistavilla matemaattisilla malleilla. Tuotannonohjausjärjestelmissä simulointia voidaan käyttää hyväksi esimerkiksi realististen, tuotantosysteemin kapasiteetin huomioivien, toimitusaika-arvioiden tuottamiseen. Lisäksi simulaatioiden avulla voidaan tutkia paikallisten muutosten vaikutusta laajemman systeemin toimintaan kokonaisuutena. (Law, 2007)

JIT-filosofian mukaisten muutosten implementointi tuotantoon voi olla kallista ja aikaa vievää (Abdulmalek & Rajgopal, 2007). Simulointitekniikoiden etuna on, että todellisen systeemin ominaisuuksia voidaan mallintaa todella joustavasti juuri riittävän tarkkuuden saavuttamiseksi (Musselman et al., 2002). Näin muutosten vaikutuksia tuotantosysteemiin voidaan arvioida tekemättä muutoksia fyysiseen tuotantosysteemiin ja häiritsemättä käynnissä olevaa tuotantoa. Lisäksi simulointimalli mahdollistaa joustavat kokeilut erilaisilla tuotantoparametriyhdistelmillä ja ohjausperiaatteilla. Tällöin päätökset suuritöisten kehitysprojektien aloittamisesta tai hylkäämisestä voidaan tehdä peukalosääntöjä ja uskomuksia paremman tiedon valossa.

Simulointimallit toimivat päätöksenteon tukena myös systeemien suunnittelussa sekä suunnitelmien kommunikoinnissa eri sidosryhmille. Tuotantosysteemiä suunniteltaessa joudutaan optimoimaan yhtäaikaisesti useita systeemin ulottuvuuksia, jotka usein ovat ristiriidassa keskenään. Monitavoitteisessa optimoinnissa tarvitaan päätöksentekoa tukevia työkaluja osatavoitteen välttämiseksi. Diskreetin tapahtumasimuloinnin avulla voidaan arvioida suunnitteluvaiheessa erilaisia ratkaisukonsepteja (monipuolisesti eri ulottuvuuksien suhteen) jo ennen investointipäätöstä (Heilala et al., 2008). Jo pelkkä mallin rakentaminen kasvattaa usein suunnitteluun osallistuvan projektitiimin ymmärrystä prosessista ja sen suoriutumiseen vaikuttavista tekijöistä. Laadukas malli tukee myös kommunikointia erilaisten sidosryhmien kanssa (Papavasileiou et al., 2007). Mallin avulla voidaan usein visuaalisella tavalla esittää tuotantosysteemi kokonaisuutena ja havainnollistaa erilaisten päätösten vaikutusta systeemin toimintaan.

Diskreetissä tapahtumasimulaatiossa systeemiä mallinnetaan simulaatiolla, jossa systeemin tilaa kuvaavat tilamuuttujat voivat muuttua vain diskreetteinä aikoina tapahtuman seurauksena. Diskreetin tapahtumasimulaation olennaiset komponentit ovat Law (2007) mukaan:

1. Systeemin tila
2. Simulaation kello
3. Tapahtumalista
4. Tilastolliset mittarit
5. Alustusrutiini
6. Aikarutiini
7. Tapahtumarutiini
8. Kirjastorutiinit
9. Raportointirutiini
10. Pääohjelma

Systeemin tilaa (1) kuvaavat tilamuuttujat sisältävät ajantasaisen ja riittävän tiedon systeemin tilasta. Simulaation kello (2) on muuttuja, johon simulaation aika tallennetaan aina sen muuttuessa. Tapahtumalista (3) sisältää aikatiedot, milloin seuraava tapahtuma kutakin tapahtumatyyppiä tulee tapahtumaan. Tilastollisiin mittareihin (4) tallennetaan tapahtumien yhteydessä tilastollisia tietoja systeemin tilasta. Alustusrutiini (5) suoritetaan simulaation alussa. Se alustaa simulaatiossa tarvittavat muuttujat vastaamaan systeemin alkutilaa. Aikarutiini (6) edistää tapahtumalistan perusteella simulaation kelloa ja määrittää seuraavan tapahtuman. Jokaiselle tapahtumalle määritelty oma tapahtumarutiini (7) muuttaa systeemin tilamuuttujia tapahtuman edellyttämällä tavalla. Kirjastorutiineja (8) käytetään satunnaislukujen generointiin mallissa määritellyistä eri todennäköisyysjakamista. Simulaation päätyttyä raportointirutiini (9) laskee tilastollisten mittareiden perusteella systeemin toimintaa kuvaavat tunnusluvut ja tulostaa raportin tuloksista. Simulaation pääohjelma (10) hallinnoi koko simulaation kulkua käynnistäen aika- ja tapahtumarutiineja vuorotellen kunnes simulaation päättymisen määrittävä ehto täyttyy.

Yksinkertainen esimerkki diskreetistä tapahtumasimulaatiosta on jonosysteemi, jossa asiakkaat yhden työpäivän aikana saapuvat kassajonoon satunnaisesti ja lähtevät jonosta asioituaan kassalla. Systeemin tilaa voidaan kuvata esimerkiksi tilamuuttujilla, jotka kertovat onko kassalla asiakasta, montako ihmistä jonossa on, ja milloin jonon asiakkaat ovat saapuneet jonoon. Systeemissä on kaksi erilaista tapahtumaa: uusi asiakas liittyy jonoon tai jonossa ollut asiakas palvelee kassalla. Ajat, milloin seuraava asiakas liittyy

jonoon, ja milloin kassalla oleva asiakas lopettaa asiointinsa kassalla, tallennetaan tapahtumalistaan. Tässä systeemissä tilastolliset mittarit laskevat palveltujen asiakkaiden määrää sekä asiakkaiden yhteenlaskettua jonotusai-
 kaa. Alustusrutiini voi esimerkiksi asettaa simulaation alussa kellon aikaan nolla ja jonossa olevien asiakkaiden määrän nolnaan. Asiakkaan saapumis-
 ta kuvaava rutiini muuttaa joko kassan tilamuuttujan odotustilasta palve-
 lutilaan (jonossa ei yhtään asiakasta) tai lisää jonossa olevien asiakkaiden
 määrää yhdellä. Asiakkaan lähtöä kuvaava rutiini taas joko muuttaa kassan
 tilan palvelutilasta odotustilaan (jonossa ei yhtään asiakasta) tai vähentää
 jonossa olevien asiakkaiden määrää yhdellä. Simulaation lopussa raportoin-
 tirutiini laskee tilastollisten mittareiden perusteella esimerkiksi asiakkaiden
 keskimääräisen jonotusajan ja tulostaa sen käyttäjän näkyville. (Law, 2007)

Monte Carlo -simulaatio on menetelmä, jossa satunnaismuuttujia käytetään
 stokastisen ongelman ratkaisemiseen (Law, 2007). Simuloinneissa todennäköi-
 syysjakaumien käyttäminen yksittäisten estimaattien (kuten keskiarvojen) si-
 jaan vaikuttaa usein tuloksiin merkittävästi (Law, 2007). Käytännössä Monte
 Carlo -simulaatioissa jotakin simulaatiota toistetaan useita kertoja siten, että
 eri skenaarioissa satunnaisuutta sisältävälle parametrille arvotaan lukuarvo
 satunnaisjakaumasta, minkä jälkeen eri skenaarioiden tuloksia tutkitaan ti-
 lastollisilla menetelmillä (Papavasileiou et al., 2007). Tuotantosysteemin ka-
 pasiteetin mallintamisessa voidaan Monte Carlo -simulaation avulla ottaa
 huomioon esimerkiksi satunnainen tuotteiden kysyntä. Käyttämällä vakion
 keskiarvoisen kysynnän sijaan satunnaisjakaumasta päivittäin arvottua sa-
 tunnaislukua kysyntäparametrinä, voidaan arvioida kysynnän luonnollisen
 vaihtelun vaikutusta systeemiin ja siitä mitattaviin tunnuslukuihin. Mon-
 te Carlo -simulaatioissa toistettava simulaatio voi olla tyypiltään esimerkik-
 si diskreetti tapahtumasimulaatio, joka kuvaa tuotantosysteemin toimintaa
 annetuilla tuotteiden kysynnöillä.

Stokastisessa optimoinnissa systeemin kaikki ominaisuudet eivät ole deter-
 ministisiä vaan ne sisältävät epävarmuutta. Optimaalinen ratkaisu yhdessä
 tilanteessa ei välttämättä ole enää optimaalinen, jos ympäristössä tapahtuu
 muutoksia. Stokastisissa tuotantoaikataulutehtävissä epävarmuutta saattaa
 aiheuttaa esimerkiksi konerikot, tuotteiden kysyntä tai prosessien kestot.
 Simulaatioilla voidaan pyrkiä valitsemaan esimerkiksi aikatauluspolitiikka,
 joka epävarmuudet huomioon ottaen saavuttaa tuotantotavoitteet parhaiten.
 Jung et al. (2004) optimoivat Monte Carlo -simuloinnilla kemiallisen tuotan-
 tosysteemin varmuusvarastotasoja pyrkien toimitusketjun kokonaiskustan-
 nusten minimoimiseen stokastisen kysynnän vallitessa. Artikkelissa he pai-
 nottavat erityisesti sitä, kuinka simuloinnin avulla, vaikka analyttiset va-
 rastomallit ovat paljon tutkittuja menetelmiä, voitiin todellisen kompleksin

tuotantoympäristön ominaisuudet ottaa riittävällä tarkkuudella huomioon. Rohleder & Klassenin (2002) vertailevat lääkärin vastaanottoaikojen aikataulutuspolitiikkoja satunnaisten varausten ja vaihtelevien kysyntätasojen vallitessa. Artikkelissa lääkäriaikojen kysynnän vaihteluihin pyrittiin vastaamaan kuudella erilaisella politiikalla, joiden perustana olivat ylitöiden teettäminen sekä ylivaraus.

Kun simulaatioiden lähtötiedot, kuten tuotteiden kysyntä tai raaka-aineiden saatavuus, ovat satunnaismuuttujia, niiden ulostulot ovat myös satunnaismuuttujia. Ulostuloista tehtävien päätelmien epävarmuutta lisää tulosten suuri varianssi. Ulostulon varianssia voidaan kuitenkin pyrkiä vähentämään erilaisilla varianssin vähennystekniikoilla. Verrattaessa useita erilaisia systeemejä keskenään varianssia voidaan vähentää käyttämällä eri systeemien simuloinneissa yhteisiä satunnaislukuja. Tekniikan ideana on testata eri systeemejä samanlaisissa testiolosuhteissa, jolloin eri systeemien tulokset ovat vertailtavampia. Yhteisiä satunnaislukuja voidaan käyttää esimerkiksi siten, että samoja arvottuja kysyntäskenaarioita tai prosessiaikojen pituuksia käytetään eri systeemien simulaatioissa. (Law, 2007)

3.3 Stokastinen dominanssi

Päätöksentekoa epävarmojen tulosten välillä mallinnetaan usein stokastisella dominanssilla (Ogryczak & Ruszczyński, 1998). Stokastinen dominanssi perustuu aksiomaattiseen arvoteoriamalliin päätöksentekijän (riskiä karttavista) preferensseistä. Ensimmäisen asteen stokastisesti dominoiva vaihtoehto on dominoitua vaihtoehtoa mieluisampi jokaiselle suurempaa hyötyä tavoittelevalle päätöksentekijälle. Toisen asteen stokastisesti dominoiva vaihtoehto taas on dominoitua vaihtoehtoa mieluisampi jokaiselle suurempaa hyötä tavoittelevalle ja riskiä karttavalle päätöksentekijälle. Riskiä karttava päätöksentekijä on valmis valitsemaan mieluummin uhkapelin odotusarvoa pienemmän varman hyödyn, kuin osallistumaan uhkapeliin. Riskineutraali päätöksentekijä valitsee aina odotusarvoltaan suurimman vaihtoehdon, ja riskiä hakeva päätöksentekijä voi valita odotusarvoltaan varmaa hyötyä pienemmän uhkapelin suuren voiton toivossa.

3.3.1 Ensimmäisen asteen stokastinen dominanssi

Ensimmäisen asteen stokastinen dominanssi määritellään satunnaismuuttujien X ja Y välillä niiden kertymäfunktioiden $F_X(n)$ ja $F_Y(n)$ avulla seura-

vasti

$$X >_{s1} Y \iff F_X(n) \leq F_Y(n) \forall n \in R, \exists n F_X(n) < F_Y(n). \quad (1)$$

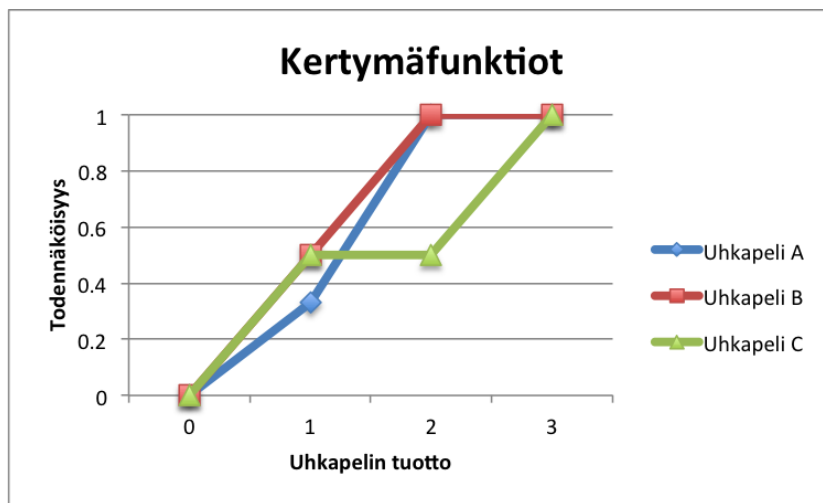
Tässä X siis dominoi Y :tä ensimmäisen asteen stokastisen dominanssin mielessä, jos X :n kertymäfunktio $F_X(n)$ saa jokaisessa pisteessä $n \in R$ enintään yhtä suuren arvon kuin Y :n kertymäfunktio $F_Y(n)$, ja vähintään yhdessä pisteessä pienemmän arvon. Tällöin todennäköisyys, että satunnaismuuttuja X tuottaa vähintään n kokoisen hyödyn, on aina suurempi kuin todennäköisyys satunnaismuuttujan Y vastaava todennäköisyys.

Ensimmäisen asteen stokastisesta dominanssista seuraa, että jos vaihtoehto B dominoi vaihtoehtoa A ensimmäisen asteen stokastisen dominanssin mielessä, B :n odotusarvo on aina A :ta suurempi. Odotusarvoltaan suurempi vaihtoehto ei kuitenkaan aina dominoi toista vaihtoehtoa. Ensimmäisen asteen stokastisesti dominoiva vaihtoehto dominoi aina myös toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä. (Ogryczak & Ruszczyński, 1998)

Ensimmäisen asteen stokastista dominanssia voidaan havainnollistaa taulukossa 1 esitetyillä uhkapeleillä A , B , ja C . Kussakin uhkapelissä pelaaja saa heittää kerran reilua kuusisivuista noppaa, minkä jälkeen pelaaja saa palkinnoksi nopan tuloksen määräämän tuoton. Nopan tuloksen ja valitun uhkapelin määrämät tuotot on esitetty taulukossa 1. Lisäksi kuvassa 3 on esitetty kunkin uhkapelin tuoton kertymäfunktio. Pelaajalle annetaan mahdollisuus osallistua yhteen annetuista uhkapeleistä. Pelaajan ongelmana on valita hänelle mieluisin uhkapeli, johon osallistua. Oletetaan, että pelaajan mieltymyksistä tiedetään vain, että hän maksimoi odotusarvoista tuottoaan ja saa mieluummin suuren kuin pienen palkinnon. Tällöin voidaan ensimmäisen asteen stokastisen dominanssin perusteella rajata pois uhkapeli B , sillä sekä A että C dominoivat uhkapeliä B . Uhkapelien kertymäfunktioista voidaan nähdä, että jokaisella mahdollisella uhkapelien tuotolla x todennäköisyys enintään x :n suuruiseen voittoon on uhkapeleillä A ja C enintään yhtä suuri kuin B :llä. Täten kaavan (1) ehto ensimmäisen asteen stokastisesta dominanssista täyttyy. Ilman tarkempaa tietoa pelaajan mieltymyksistä uhkapelejä A ja C ei voida asettaa paremmuusjärjestykseen, vaikka C :n odotusarvo on A :n odotusarvoa suurempi, sillä C ei dominoi uhkapeliä A .

Taulukko 1: Kolme uhkapeliä, joiden tuotto riippuu yhden kuusisivuisen nopan heiton tuloksesta.

Uhkapeli \ Nopan tulos	1	2	3	4	5	6
A	1	1	2	2	2	2
B	1	2	1	2	1	2
C	3	3	3	1	1	1



Kuva 3: Esimerkki ensimmäisen asteen stokastisesta dominanssista. Kumpikin uhkapeli A ja C dominoivat uhkapeliä B. Uhkapelin C odotusarvo on uhkapelin A odotusarvoa suurempi, mutta A ei dominoi C:tä.

3.3.2 Toisen asteen stokastinen dominanssi

Toisen asteen stokastinen dominanssi määritellään satunnaismuuttujien X ja Y välillä seuraavasti

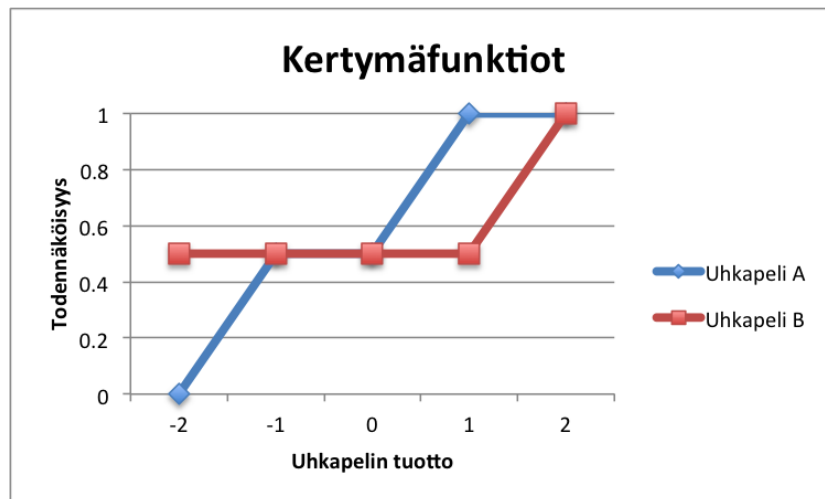
$$X >_{s_2} Y \iff \int_{-\infty}^n F_X(k) - F_Y(k) dk \leq 0 \forall n \in R, \exists n \int_{-\infty}^n F_X(k) - F_Y(k) dk < 0. \quad (2)$$

Eli X dominoi Y :tä toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä, kun X :n kertymäfunktion $F_X(n)$ integraali kaikissa pisteissä n saa enintään yhtä suuren arvon kuin Y :n kertymäfunktion $F_Y(n)$ integraali, ja vähintään yhdessä pisteessä pienemmän. Tällöin satunnaismuuttujan X tulos on varmempi ja sisältää satunnaismuuttujaa Y vähemmän riskiä. Toisen asteen stokastinen dominanssi on välttämätön ehto ensimmäisen asteen stokastiselle dominanssille, mutta ei riittävä ehto. (Ogryczak & Ruszczyński, 1998)

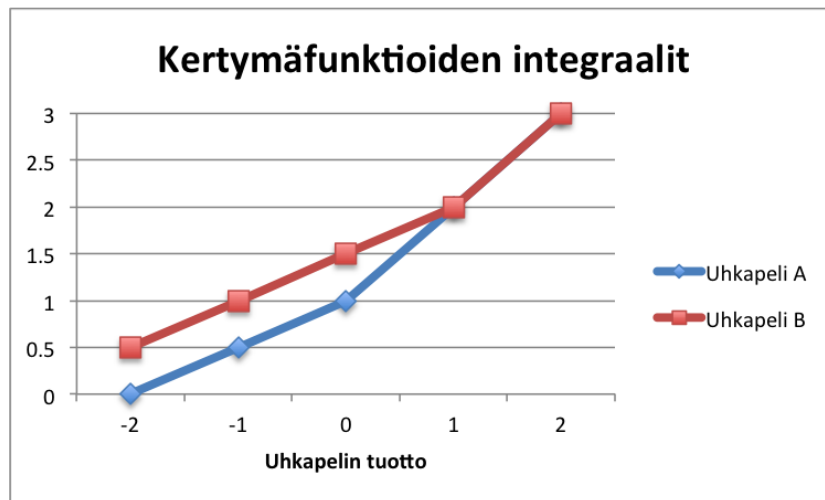
Toisen asteen stokastista dominanssia on havainnollistettu kahdella uhkape-
 lillä A ja B, joissa kummassakin heitetään yhtä kolikkoa. Uhkapelien tuotot
 heiton tuloksen mukaan on esitetty taulukossa 2. Lisäksi tuottojen kertymä-
 funktiot on esitetty kuvassa 4, ja kertymäfunktioiden integraalit kuvassa 5.
 Jos pelaajan oletetaan olevan riskiä karttava ja odotusarvoista tuottoa mak-
 simoiva, voidaan toisen asteen stokastisen dominanssin avulla todeta uhka-
 peli A uhkapeleä B mieluisemmaksi. Kuvasta 4 ja erityisesti kuvasta 5 voi-
 daan nähdä, että uhkapelin A kertymäfunktion integraali on aina enintään
 yhtä suuri kuin uhkapelin B. Täten kaavan (2) mukaisesti uhkapeli A domi-
 noi B:tä toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä. Käytännössä domi-
 nanssi johtuu uhkapelin A pienemmästä riskistä ja vähintään yhtä suuresta
 odotusarvosta.

Taulukko 2: Taulukossa on esitetty kaksi uhkapeleä, joiden tuotto riippuu yh-
 den kolikonheiton tuloksesta. Uhkapeleä A dominoi uhkapeleä B toisen asteen
 stokastisen dominanssin mielessä.

Uhkapeleä \ Kolikonheiton tulos	Kruuna	Klaava
A	-1	1
B	-2	2



Kuva 4: Esimerkki toisen asteen stokastisesta dominanssista. Uhkapelien A
 ja B tuottojen kertymäfunktioita. Uhkapeleä A dominoi B:tä toisen asteen sto-
 kastisen dominanssin mielessä.



Kuva 5: Uhkapelien A ja B tuottojen kertymäfunktioiden integraalit. Uhkapelin A kertymäfunktion integraali on jokaisessa pisteessä enintään yhtä suuri kuin uhkapelin B. Uhkapeli A dominoi siten uhkapeliä B toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä.

3.4 Imuohjaus ja tilauksesta valmistaminen

Periaatteena imuohjaus tarkoittaa sitä, että tuotantoa ohjataan toteutuneiden asiakastilausten ja niiden generoimien materiaalityötarpeiden perusteella myyntiennusteiden sijaan. Tilauksesta valmistaminen (Make to Order, MTO) on suoraviivainen imuohjauksen muoto, jossa tuotteita ei valmisteta varastoon vaan suoraan toimitettavaksi asiakkaalle tilausta vastaan. Tilattu tuote on siis tarkoitus valmistaa asiakkaalle luvatussa toimitusajassa, jolloin varsinaista lopputuotevarastoa ei tarvita. Tilauksesta valmistaminen on erityisen hyödyllistä jos (i) lopputuotteiden varastointikustannukset ovat korkeat, (ii) valmiiden tuotteiden kelpoisuusajat ovat lyhyitä, (iii) tuotteiden myynti on vaikeasti ennustettavaa, tai (iv) tuotteet ovat hyvin monimuotoisia tai räätälöitäviä. (Packowski, 2014)

MTO-valmistamiselle on kaksi elintärkeää ehtoa: tuotannon toimitusajan on oltava asiakkaan toimitusaikavaatimusta lyhyempi, ja tuotannon kapasiteetin on pystyttävä joustamaan asiakaskysynnän mukaan. Jos esimerkiksi asiakkaan toimitusaikavaatimus on 2 viikkoa, ja tuotannon toimitusaika tuotteille on 3 viikkoa, tilauspistettä ei voida asettaa tuotannon alkuun. Asiakkaan toimitusaikavaatimuksen mukaisesti tilauspistettä, eli pistettä jossa asiakas tilaus synnyttää tuotantotilauksen, voidaan siirtää tuotantoketjussa ylä- tai alavirtaan, esimerkiksi raaka-ainevalmistukseen tai pakkaukseen. Toisen vaatimuksen mukaisesti kapasiteetin tulee voida joustaa asiakaskysynnän mukaisesti. Mikäli tuotannon kapasiteetti ei pysty joustamaan kysynnän mukaisesti, tuotteita ei voida toimittaa asiakkaiden toimitusaikavaatimusten mukaisesti kysynnän kasvaessa. Jos tuotannon kapasiteetti ei ole joustavaa, mikä on prosessiteollisuudessa usein vallitseva tilanne, kysynnän vaihtelut täytyy tasata kapasiteetin sijasta lopputuotevarastoja pitämällä. (Packowski, 2014)

3.5 Syklinen aikataulut

Heuristiset optimointialgoritmit pyrkivät yksinkertaisia sääntöjä noudattamalla löytämään riittävän hyvän ratkaisun optimointiongelmaan. Aikataulutongelmat ovat usein NP-kovia ongelmia, mistä johtuen eksaktien ratkaisualgoritmien laskenta-ajat ovat käytännöllisen kokoisissa ongelmissa erittäin pitkiä. Aikataulujen optimoinnissa erilaiset heuristiikat ja metaheuristiikat ovatkin suosittuja ja paljon tutkittuja työkaluja. Heuristisilla menetelmillä voidaan menetelmästä riippuen saada tyydyttävä ratkaisu lähes välittömästi.

Syklinen aikataulutus on tuotantoaikataulutuksessa käytetty aikataulutustekniikka, jossa etukäteen määriteltä tuotteiden tuotantojärjestystä toistetaan tuotannossa syklisesti. Syklinen aikataulutus voidaan siten luokitella heuristiseksi aikataulutusalgoritmiksi.

Packowski (2014) esittelee kirjassaan kolme rytmityspyörä-tyyppistä syklistä aikataulutusmenetelmää epävarman kysynnän ja tuotantosysteemin kapasiteetin hallitsemiseksi: Classic Rhythm Wheel (CRW), Breathing Rhythm Wheel (BRW), ja High-Mix Rhythm Wheel (HRW). Kunkin rytmityspyörämallin perustana on tuotteille määriteltä optimaalinen valmistusjärjestys, jossa tuotteita on tarkoitus valmistaa toistaen rytmityspyörän kiertokulkua. Syklisen aikataulutusmallin etuja on, että malli on helppo visualisoida ja kommunikoida. Lisäksi toistuva tuotantorytmi ja -järjestys tukevat oppimista tuotanto-organisaatiossa.

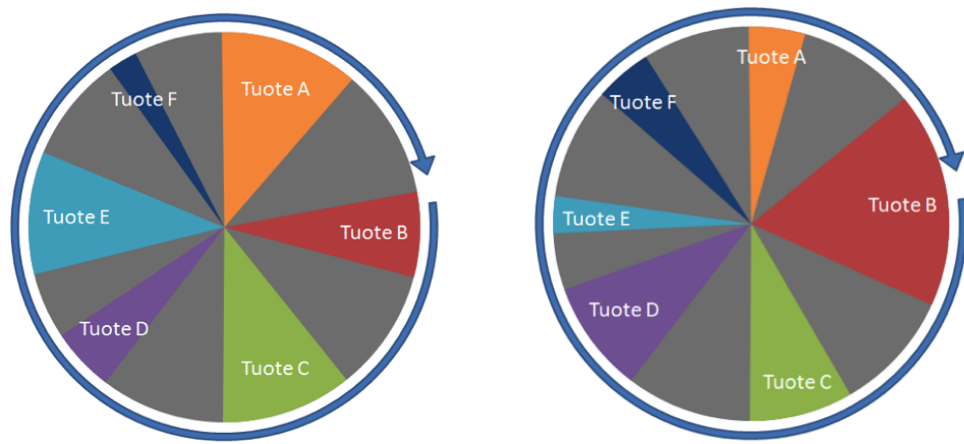
3.5.1 Classic Rhythm Wheel

CRW:ssä jokaista tuotetta valmistetaan kussakin syklissä ennaltamääriteltä vakiomäärä. Tuotantosykliksi on esimerkiksi voitu määrittää työviikko, jonka aikana ensin valmistetaan 7 erää tuotetta "A", sitten 3 erää tuotetta "B", ja lopuksi 11 erää tuotetta "C". Tätä tuotantosykliä on tarkoitus toistaa joka viikko.

CRW:n etuna on sen yksinkertaisuus, mutta menetelmä ei sopeudu nopeisiin kysynnän muutoksiin ja yksittäisen syklin pituus saattaa kasvaa suureksi, jos valmistusportfoliossa on suuri määrä tuotteita. CRW:tä käytettäessä kysynnän vaihtelut täytyy kokonaisuudessaan tasata varmuusvarastojen avulla, sillä tuotannon rytmi ja valmistettävien tuotteiden määrät on vakioitu. Classic Rhythm Wheel soveltuu siten parhaiten ympäristöihin, joissa kysyntä on tasaista ja ennustettavaa, eivätkä valmiiden tuotteiden varastointikustannukset ole korkeita.

3.5.2 Breathing Rhythm Wheel

BRW:ssä jokaista tuotetta valmistetaan kussakin syklissä muuttuva määrä, joka heijastelee tuotteen todellista kysyntää. BRW on CRW:n tapaan rakenteeltaan yksinkertainen ja lisäksi mukautuu tuotteiden kysyntävaihteluihin. BRW:n, kuten CRW:nkin, heikkoutena on yksittäisen syklin suuri pituus, jos tuotteita on paljon, ja heikko prosessointiaikojen suhde asetusaikeihin jos sarjapituudet ovat lyhyitä. Yksittäisen syklin pitkä pituus ei välttämättä ole suotavaa, sillä pitkä suunnittelujakso hidastaa nopeisiin muutoksiin vastaamista ja keskimääräiset varastotasot ja valmistussarjojen pituudet täytyy



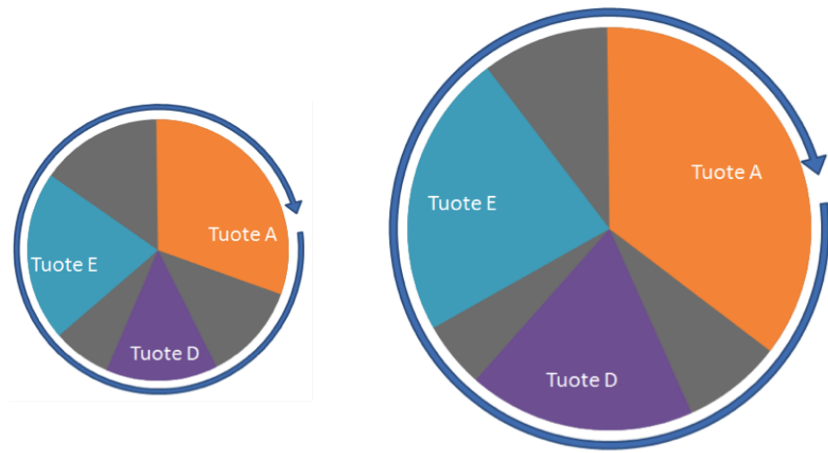
Kuva 6: Kaksi samanpituista tuotantosykliä samoilla tuotteilla ja asetus- ja prosessointiaikojen suhteilla, mutta asiakaskysynnän mukaan joustavilla tuotteiden välisillä valmistusmäärien suhteilla.

pitää korkeina, kun kerralla valmistettujen tuotteiden täytyy riittää pitkäksi aikaa ennen seuraavaa täydennystä. Toisaalta liian lyhyissä sykleissä tuottaminen johtaa useampiin asetuksiin ja siksi keskimääräisen tuotantokapasiteetin laskuun. Packowskin mukaan BRW-mallissa syklien pituuksille pitäisikin määritellä minimi- ja maksimirajat, joiden välissä tuotantosyklien pituuksia tulisi pysyä. Rajojen ylittävät tarpeet tasataan tuotannossa varastojen kautta pitkällä aikavälillä.

Kuvassa 6 on havainnollistettu tuotantosykli, jonka pituus pysyy vakiona, mutta valmistettavien tuotteiden määrien suhteet vaihtelevat. Kirkkailla väreillä on esitetty tuotteiden prosessointiajat koneella ja harmaalla tuotantosarjojen välissä tehtävien asetusten ajat. Kuvassa 7 taas on havainnollistettu tuotantosyklin pituuden vaikutusta asetus- ja prosessiaikojen suhteeseen.

3.5.3 High-Mix Rhythm Wheel

HRW:ssä sekä syklissä valmistettavat tuotteet että syklin pituus voivat vaihdella. Menetelmä soveltuu erityisesti volyymiltään heterogeenisen tuoteportfolion hallintaan, eli portfolion, jossa on sekä suuren että pienen volyymin tuotteita. Packowskin (2013) mukaan on olennaista erottaa toisistaan suurivolyymiset ja arvoltaan suuret ”A” tuotteet sekä pienivolyymiset ja arvoltaan pienet ”C” tuotteet toisistaan. Jakoa eri tuoteluokkiin on havainnollistettu kuvassa 8. Kun tuotteet on jaettu eri luokkiin, tuotteiden asemat eri sykleissä voidaan määrittää. Kuvassa 9 on esitetty kaksi tuotantosykliä,

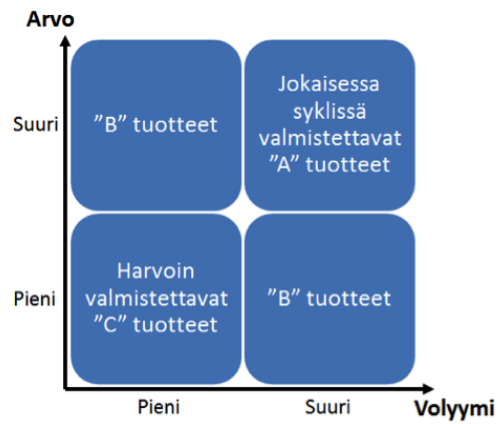


Kuva 7: Kaksi eripituista tuotantosykliä samanlaisilla tuote-mixeillä. Asetusaikojen suhde prosessiaikoihin paranee valmistuserien pituuksien kasvaessa.

joiden pituudet ovat samat, mutta erilaisten tuotteiden määrä vaihtelee. Vähemmän tuotteita sisältävässä syklissä prosessiaikojen suhde asetusaikeihin on parempi kuin monia tuotteita sisältävässä syklissä, koska asetuksia on vähemmän.

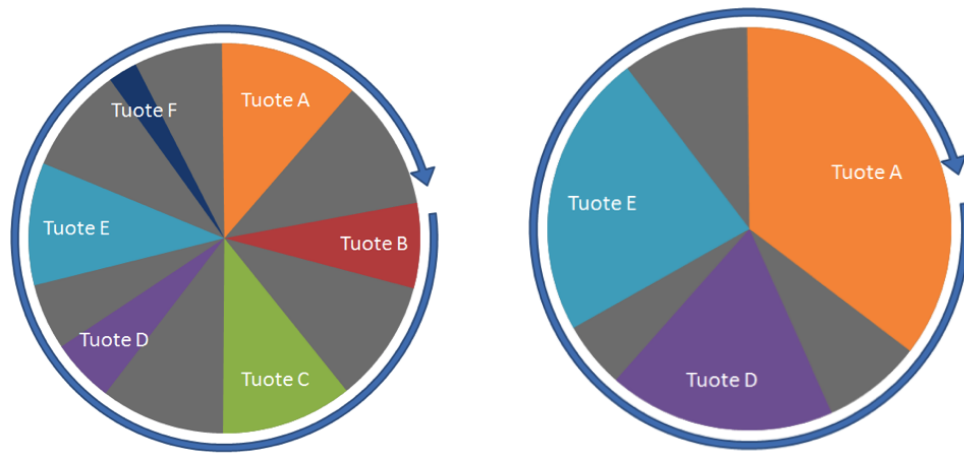
Jokaisessa jaksossa ei ole tarkoitus valmistaa jokaista tuotetta vaan pienivolyymisiä "C" tuotteita voidaan valmistaa suurivolyymisiä "A" tuotteita harvemmassa tahdissa. Tämä johtaa siihen, että suurivolyymisen tuotteen tuotantosarjakoko pienenee ja pienivolyymisten tuotteiden tuotantosarjakoko kasvaa. Tällöin verrattuna tilanteeseen, jossa jokaista tuotetta valmistetaan jokaisessa syklissä, suurivolyymisen ja varastoarvoltaan suuren tuotteen keskimääräinen varastotaso alenee pienivolyymisten ja varastoarvoiltaan pienten tuotteiden varastotasojen hieman kasvaessa. Optimaalisten tuotantorytmien määrittämiseksi tulisikin vertailla suurivolyymisten tuotteiden pienempien varastojen etuja pienivolyymisten kasvavien varastojen haittoihin. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 10.

Syklissä valmistettavien tuote-erien määrää ja rytmitystä pyritään säätämään toteutuneen asiakaskysynnän pohjalta. Packowski (2013) esittää tähän ongelman ratkaisemiseen kolmea menetelmää. Ensimmäinen menetelmä, ns. Blanco Space, on määrittää syklin kapasiteetista etukäteen tietty osuus pienivolyymisten tuotteiden valmistamiseen ja tehdä tuotantopäätökset pienivolyymisten tuotteiden osalta jokaisessa aikataulutussyksissä erikseen. Toinen menetelmä, ns. Fixed Frequencies, on määrittää jokaiselle tuotteelle kiinteä

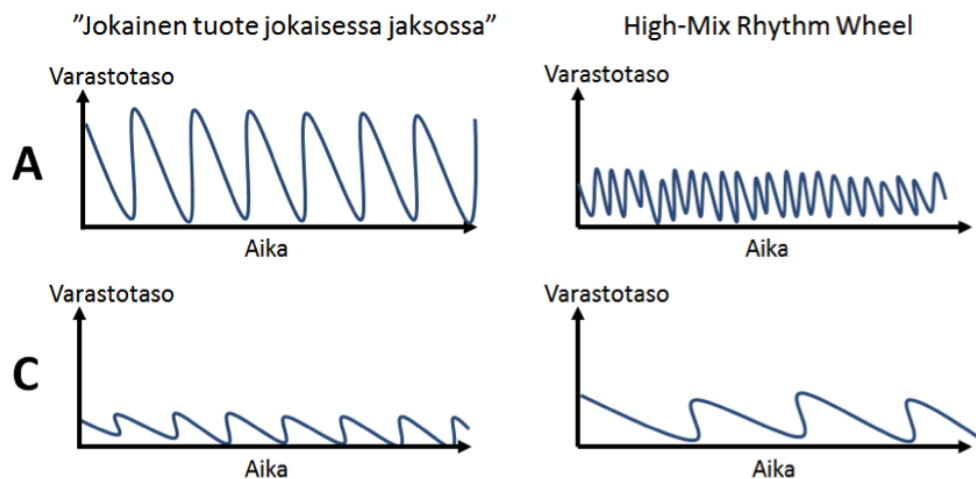


Kuva 8: High-Mix Rhythm Wheel –periaatetta käytettäessä on olennaista jakaa valmistettavat tuotteet eri luokkiin niiden volyymien ja varastoarvojen suhteen. (Packowski, 2013)

rytmi, jossa tuotetta aina valmistetaan. Menetelmän etuja ovat yksinkertaisuus sekä ennustettavat materiaalitytarpeet, mutta menetelmän joustamattomuus voi johtaa muita menetelmiä suurempiin varmuusvarastotarpeisiin. Kolmas menetelmä, ns. Minimum Make Quantities, perustuu tuotteille määriteltäviin minimisarjakokoihin. Menetelmässä pienivolyyminen tuote aikataulutetaan tuotantoon vasta kun tuotteelle on kertynyt riittävästi kysyntää minimisarjakokovaatimuksen täyttämiseksi. Menetelmän etuna on joustavuus asiakaskysynnän mukaan, mutta materiaalityrpeita ja toimitusaikoja voi olla vaikeaa arvioida tarkasti etukäteen.



Kuva 9: Kaksi yhtä pitkää tuotantocykliä erilaisilla tuoteyhdistelmillä ja sarjapituuksilla. Asetusaikojen suhde prosessointiaikoihin paranee syklissä valmistettavien erilaisten tuotteiden vähentyessä ja valmistuserien pituuksien kasvaessa.

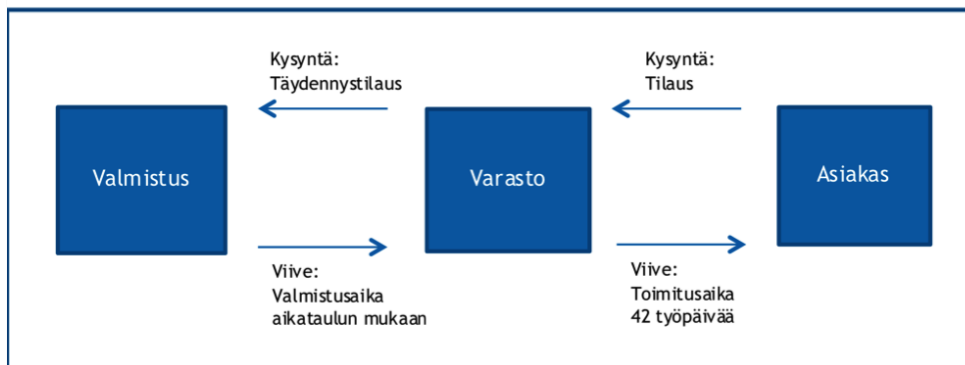


Kuva 10: Havaintokuva keskimääräisten varastotason pienentymisestä, kun suurivolyymisen tuotteen A valmistustaajuus kasvaa ja pienivolyymisen tuotteen C valmistustaajuus pienenee. (Packowski, 2013)

4 Tutkimusongelma ja -menetelmät

4.1 Tuotantosysteemin määrittely

Tutkittava tuotantosysteemi rajattiin kolmeen kokonaisuuteen: valmistukseen, lopputuotevarastoon sekä asiakaskuntaan. Valmistusta käsiteltiin kolmen tuotteen valmistamiseen vaadittavan päävaiheen näkökulmasta. Jokaisessa vaiheessa prosessi mallinnettiin koneen tarkkuudella. Lopputuotevaraston tarkoitus oli varmistaa lopputuotteen toimitus asiakkaalle toimitusehtojen mukaisesti viimeistään 42 työpäivää asiakkaan tilauksen jälkeen. Asiakaskysyntä mallinnettiin Poisson-prosessin avulla yksittäisiä asiakkaita erittelemättä. Kaaviokuva toimitusketjusta ja sen rakenteesta on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11: Toimitusketjun karkea rakenne.

Imuohjaus voitaisiin imuohjauksen vaatimusten mukaisesti järjestää systeemissä valmistuksen ensimmäisestä vaiheesta alkaen. Tuote-erän yhteenlaskettu prosessointiaika valmistuksen kolmessa vaiheessa on tuotteesta riippuen noin 1-2 vuorokautta. Imuohjauksen suurimmaksi haasteeksi tuotantoympäristössä todettiin riittämätön kapasiteetti suurella tuoteportfoliolla ja lyhyillä valmistussarjoilla johtuen tuotteiden pitkistä järjestysriippuvaisista asetusaajoista. Simulointikokeissa tarkasteltiin suunnittelujakson pituuden ja minimivalmistusmäärien vaikutusta kapasiteettiin ja toimitusaikoihin, ja siten imuohjauksen toteutumisedellytyksiin.

4.1.1 Valmistus

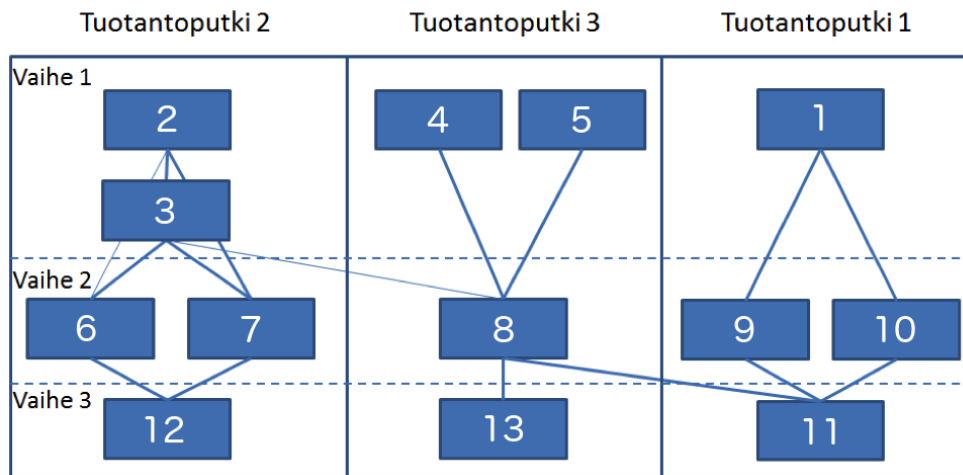
Valmistettavien tuotteiden valmistus jakautui kolmeen päävaiheeseen, joita tutkimuksessa kuvattiin numeroilla 1, 2 ja 3. Jokaisessa vaiheessa jokaiselle tuotteelle oli määritelty yksi tai useampi kone, jolla tuotteen vaihe voitiin suorittaa. Tuotteesta riippuen vaiheen suorittaminen vaati tuotteen käsitte-lyä yhdellä tai kahdella koneella. Vaiheiden väliset ja sisäiset järjestykset oli tarkkaan määrätty, eikä niistä voinut poiketa.

Tuotteiden prosessointi- ja asetusajat oletettiin tunnetuiksi ja vakioiksi eli niihin ei sisällynyt epävarmuutta. Tuotteiden prosessointiajat riippuivat prosessoivasta koneesta. Pääsääntöisesti vaiheet 1 ja 3 olivat kestoiltaan samaa kokoluokkaa ja vaihe 2 noin kaksi kertaa vaiheen 1 pituinen. Asetusaikojen pituudet riippuivat sekä prosessoivasta koneesta että prosessoitavien tuotteiden järjestyksestä. Erot sekä eri koneiden asetusten että koneen eri asetusten välillä olivat merkittävät suhteessa tuotteiden prosessointiaikoihin. Simulaatiossa käytetyt asetus- ja prosessointiajat valittiin tuotannossa käytettävien tavoiteaikojen perusteella. Koneiden oletettiin olevan jatkuvasti käytettävissä ilman konerikkoja tai muita pullonkaularesursseja, kuten henkilöresursseja tai raaka-aineita, jotka voisivat estää koneiden käyttämisen.

Erikoistyössä tutkittiin valmistuksen jäsentämistä tuotantoputkiin. Vaiheessa 1 suurimmalla osalla tuotteista oli vain yksi mahdollinen kone, jolla vaihe voitiin suorittaa. Vaiheiden 2 ja 3 koneet taas olivat pääsääntöisesti yleiskoneita, joilla voitiin prosessoida mitä tahansa tuotetta. Tuotantoputkimallisissa jokaiselle tuotteelle määritettiin jokaisessa vaiheessa ensisijaiset koneet, joilla tuote pyritään aina valmistamaan. Erottamalla tuotteiden valmistusta erillisiin tuotantoputkiin vähennetään eri koneiden ja tuotteiden valmistusai-kataulujen riippuvuuksia toisistaan, mikä yksinkertaistaa tuotantoprosessin aikatauluttamista. Kuvassa 12 on esitetty kaaviokuva tuotantosysteemin koneista ja tuotteiden poluista eri vaiheissa ja tuotantoputkissa.

Tuotantoputkien määrittelyn perusteena käytettiin tuotteiden ennustettua menekkiä, konerajoituksia, sekä pesuryhmiä. Tuotantoputkijaon piti noudattaa eri tuotteille määriteltyjä pakollisia konerajoituksia erityisesti vaiheessa 1, mutta myös erityistapauksissa vaiheissa 2 ja 3. Konerajoitukset olivat pääasiallinen syy, miksi tuotantoputkista ei määritelty täysin irrallisia. Packowski (2013) mukaan tuotantoputkien jaon, eli tuotteiden jaon tuotantoresursien kesken, on hyvä perustua tuotteiden kysyntävolyymiin ja sen vaihteluun, sekä resurssien kapasiteettiin ja joustavuuteen. Volyymien vaihteluja ei tässä työssä käsitelty, joten tuotantoputkien jako perustui Packowskin kriteerien suhteen ensisijaisesti tuotteiden volyymeihin. Tuotantoputkesta 2 määritettiin putki suurivolyymisille ja tasaisille tuotteille, kun taas tuotantoputkista 1

ja 3 määritettiin pienempi volyymisten tuotteiden tuotantoputkia. Asetusajojen minimoimiseksi saman pesuryhmän (tuoteperheen) tuotteet sijoitettiin samaan tuotantoputkeen. Jaon tarkoituksena oli rajata tuotantoputken 2 tuotteiden määrä pieneksi ja pyrkiä valmistamaan tuotteita muita tuotantoputkia pidemmissä sarjoissa tuotantoputken kapasiteetin kasvattamiseksi. Saman vaiheen eri resurssien ominaisuudet eivät vaiheen 2 yksittäistä poikkeusta (kone 7) lukuun ottamatta merkittävästi vaihdelleet määrättyjen konerajoitusten sallimien joustojen puitteissa. Kapasiteetiltaan suurempi ja vähemmän joustava kone 7 sijoitettiin Packowskin resurssinjakomallin mukaisesti suurivolyymiseen tuotantoputkeen 2.



Kuva 12: Valmistuksen kolmivaiheinen rakenne ja valmistuksen kolme tuotantoputkea. Janoilla on esitetty tuotteiden polut tuotantoputkissa. Ohuet janat esittävät volyymiltään vähäisiä tuotevirtoja.

4.1.2 Varasto

Lopputuotevarastossa säilytetään valmistuksesta valmistuneet tuotteet ja varastosta toimitetaan valmiit tuotteet asiakkaille sovitun toimitusajan puitteissa. Mallissa toimitusajaksi asiakkaalle oli määritelty 60 päivää, mikä 5 päivän työviikolla vastaa noin 42 työpäivää. Varastossa pidetään yllä varmuusvarastoa, josta asiakastilaus poimitaan tapauksissa, joissa asiakkaan tilausta ei saada valmistettua 60 päivän toimitusajan puitteissa. Varmuusvaraston ylläpito sitoo yrityksen pääomaa, minkä takia varmuusvaraston kokoa pyritään minimoimaan. Toisaalta pieni varmuusvarasto on altis toimitusketjun häiriöille, kuten konerikoille, raaka-aineiden saatavuusongelmille ja asiakaskysynnän heilahteluille, mikä heijastuu toimitusvarmuuteen.

4.1.3 Asiakas

Työn mallissa tuotteiden kysyntöjen oletettiin seuraavan Poisson-prosesseja tuotekohtaisilla parametreilla λ_i . Poisson-prosessin yleiset ominaisuudet on esitetty kappaleessa 3.1. Täten asiakastilausten oletettiin tulevan satunnaisina aikoina yksittäin ja edellisistä tilauksista riippumatta vakiointensiteetillä. Tarkastelujakson pituutena käytettiin yhtä päivää ($s = 1$), jolloin diskreetistä Poisson-jakaumasta voitiin generoida päivittäiset kysyntätasot erikseen jokaiselle tuotteelle.

Mallissa tuotteiden kysyntäprosessien parametrit määritettiin vuosittaisen kysyntäennusteen perusteella. Vuosittaisesta ennusteesta määritettiin jokaiselle tutkitusta noin sadasta tuotteesta Poisson-prosessin päiväkohtainen intensiteetti jakamalla vuosiennuste 260 työpäivällä, mikä vastaa 5 työpäivää 52 viikon aikana. Tuloksien oletuksena on siis, että keskimääräinen vuosikysyntä voidaan ennustaa luotettavasti kohtuullisella tarkkuudella, ja että tuotteiden kysynnöissä ei ilmene voimakasta kausivaihtelua.

4.2 Tutkimusongelman määrittely

Työn tavoitteena on arvioida annetun tuotantosysteemin edellytyksiä toimia tuotantoputkimallisissa tilauksesta valmistaminen (MTO) ja rytmityspyörä (Rhythm Wheel) -periaatteita hyödyntäen. Simulointimallilla tutkitaan erimittaisten aikataulutussykliä ja minimivalmistusmääriin (MMQ) perustuvien aikataulutuspoliittikkojen vaikutusta tuotantosysteemiin. Erityisesti pyritään selvittämään riittävän tuotantokapasiteetin tuottavat aikataulutusjaksojen pituudet ja -politiikat sekä vertailemaan näitä politiikkoja syntyvien varastotarpeiden suhteen.

Tuotantosysteemin kapasiteettia arvioidaan tutkimalla keskimääräisiä toimitusaikoja sekä konekohtaisista kuormitusluvuista muodostettuja koko systeemin tilaa kuvaavia kuormituskuvaajia. Systeemin kyvykkyyttä toimittaa satunnaiset asiakastilaukset toimitusajan puitteissa arvioidaan myöhästyneistä toimituksista syntyvien varmuusvarastotarpeiden avulla. Eri politiikkojen synnyttämiä varmuusvarastotarpeita verrataan toisiinsa 1. asteen ja 2. asteen stokastisia dominansseja hyödyntäen. Varmuusvarastotarpeita tarkastellaan sekä kaikkien, yhteensä noin sadan, tuotteiden yhteenlaskettujen tarpeiden että erikseen tuoteryhmän A näkökulmasta. Ohjauspolitiikkojen arvioitavat ominaisuudet ja käytettävät mittarit on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3: Ohjauspolitiikkojen arvioitavat ominaisuudet sekä mittarit, joilla ominaisuuksia arvioidaan.

Mitattava ominaisuus	Mittarit
Tuotantokapasiteetti	Keskimääräiset toimitusajat Kuormituskuvaajat
Varmuusvarastotarpeet kaikkien tuotteiden osalta	1. asteen stokastinen dominanssi 2. asteen stokastinen dominanssi
Varmuusvarastotarpeet tuoteryhmän A osalta	1. asteen stokastinen dominanssi 2. asteen stokastinen dominanssi

Työn koeasetelma on esitetty taulukossa 4. Taulukossa on esitetty tutkitut tuotantoputkien 1 ja 2 minimisarjakokovaatimusten yhdistelmät sekä eri suunnittelujaksojen eli aikataulutussykliä pituudet. Jokaista yhdistelmää simuloidaan jokaisella suunnittelujakson pituudella 5000 kertaa 300 työpäivän mittainen simulointijakso. 300 työpäivän mittaisia simulointeja tehdään aikaperustaisilla jaksoilla siis yhteensä 540 000.

Taulukko 4: Työn koeasetelma. Ensimmäisessä ja toisessa sarakkeessa on listattu minimisarjakokovaatimusten yhdistelmät tuotantoputkissa 1 ja 2. Kolmannessa sarakkeessa on listattu eri aikaperustaiset suunnittelujaksojen pituudet, joilla jokaista yhdistelmää simuloitiin.

Minimisarjakoko: Tuotantoputki 1 [erä]	Minimisarjakoko: Tuotantoputki 2 [erä]	Suunnittelujakson pituus [päivä]
1	1	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
1	2	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
1	3	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
1	4	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
1	5	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
1	6	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
2	2	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
2	3	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
2	4	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
2	5	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
2	6	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40
3	3	1, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40

Aikataulutussykliä pituutta voidaan ajan lisäksi mitata aikataulutettavien erien määrässä. Systeemiä simuloidaan ilman minimisarjakokovaatimuksia

(1x1) erämääräperustaisilla jaksonpituuksilla. Sridharan & Berry (1990) totesivat artikkelissaan tuotantoaikataulun jäädyttämiseen käytettävän jakso-tiedon (erämäärä tai aika) tyyppin vaikuttavan merkittävästi aikataulutuksen hyvytyteen, kun kriteereinä käytettiin aikataulun stabiilisuutta ja eräkokokustannuksia. Työssä vertaillaan lyhyesti erämääräperustaisia aikataulutuskaksoja niitä vastaaviin aikaperustaisiin jaksoihin.

4.3 Menetelmät

Tutkimusongelman asettamien tavoitteiden mukaisesti työssä rakennettiin simuloimimalli Matlab-ohjelmistolla kuvaamaan tuotantosysteemin toimintaa. Simulaatioilla voitiin vertailla tuotannon aikataulutukseen käytettäviä tuotantoputkikohtaisia aikataulutuspoltiikkoja. Simulaation tuloksena saatuja varastotarvetietoja analysoitiin stokastisten dominanssien avulla.

4.3.1 Simulointimalli

Työn simulointimalli oli tyyppiltään diskreettiaikainen tapahtuma simulaatio. Kuvaus mallin yleisestä toimintaperiaatteesta on esitetty kuvassa 13. Mallissa käytettiin hyväksi tulosten varianssin pienentämiseksi Common Random Numbers -tekniikkaa (Law, 2007) kysyntäskenaarioiden suhteen (eli kaikki simuloinnit perustuivat samoihin 5000 kysyntäskenaarioihin 300 päivän ajanjaksolla). Näin yksikään aikataulutuspoltiikka ei voinut hyötyä sille suotuisista arvonnoista kysyntäskenaarioissa.

Simulaation alussa Excel-tilukoista haettiin simulaation taustatiedoiksi tuotteiden kysyntä ja tuotantoparametrit, eli prosessointiajat eri koneilla sekä koneittaiset asetusmatriisit. Kysyntäparametrien perusteella jokaiselle noin sadalle tuotteelle arvottiin yhteensä 5000 erilaista 300 päivän mittaista kysyntäskenaariota Poisson-jakaumaa käyttäen. Muistin säästämiseksi kaikkia skenaarioita ei pidetty kerrallaan tietokoneen muistissa. Uusi skenaario pidettiin muistissa vain sen ajan, kun skenaarioon liittyviä simuloiteja suoritettiin. Tämän jälkeen skenaario korvattiin muistissa uudella arvotulla skenaariolla.

Seuraavassa vaiheessa valittiin simulaatiossa käytettävät aikataulutuspametriit muodossa $(X_1 \times X_2, Y)$, jossa X_1 ja X_2 olivat minimisarjapituudet tuotantoputkien 1 ja 2 ensimmäisissä vaiheissa ja Y aikataulutuskakson pituus työpäivissä tai erien määrässä. Seuraavaksi valitulla politiikalla simuloi-

tiin tuotantosysteemin toimintaa jokaisessa kysyntäskenaariossa 300 työpäivää.

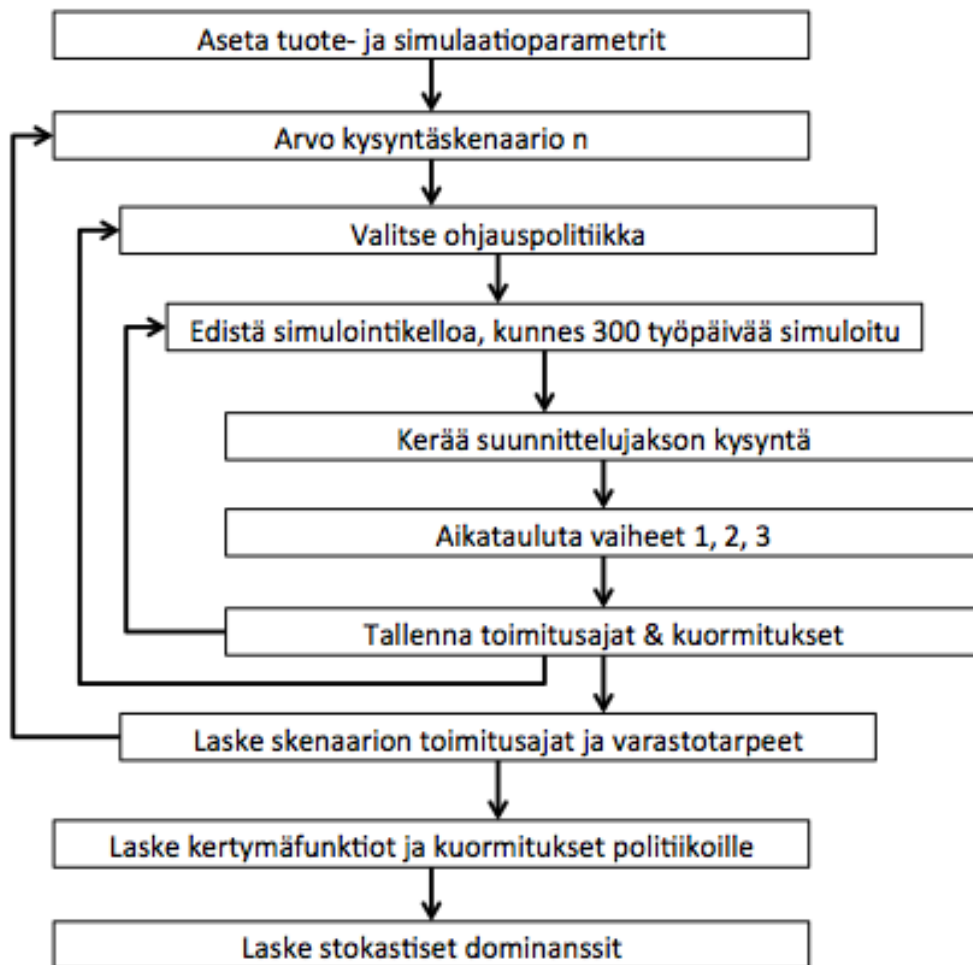
Aikaperusteisissa aikataulutuskajoissa asiakastilauksia kerrytettiin jakson pituuden verran, minkä jälkeen tilatut tuotteet aikataulutettiin valitun politiikan mukaisesti. Mikäli tuotteen tilausmäärä ei ylittänyt määriteltyä sarjan minimipituutta, tilaukset siirrettiin seuraavaan jaksoon. Erämääräperusteisissä aikataulutuskajoissa tilauksia kerrytettiin, kunnes määritelty määrä asiakastilauksia oli vastaanotettu.

Aikataulutetuille tuotteille laskettiin toimituspäivä aikataulutusalgoritmien muodostaman tuotanto-ohjelman valmistumisaikojen perusteella. Käytetyt aikataulutusalgoritmit olivat karkeita heuristiikkoja, joiden avulla pyrittiin mallintamaan todellisen tuotantosysteemin kapasiteettia riittävällä tarkkuudella. Monimutkaisemmat heuristiikat olisivat saattaneet tuottaa tiiviimpiä aikatauluja ja kasvattaa siten tuotantosysteemin kapasiteettia, mikä olisi vaikuttanut simulointien tuloksiin. Yksinkertaisilla heuristiikoilla saatiin kuitenkin laskettua yksittäiset aikataulut nopeasti, jolloin simulaatioiden kokonaislaskenta-ajat pysyivät maltillisina. Erille, joiden toimitusaika ylitti asiakasvaatimuksen 42 työpäivää, varmuusvarastotarve merkittiin päville asiakkaan toimituspäivästä erän valmistumiseen.

Päivittäiset varastotarpeet yhteenlaskemalla saatiin päiväkohtaisista varastotarpeiden erämääräisistä tasoista muodostettua kertymäfunktio jokaiselle aikataulutuspoltiikalle. Viimeisessä vaiheessa kertymäfunktioita vertailtiin laskemalla ensimmäisen ja toisen asteen stokastisia dominansseja kertymäfunktioiden kesken.

4.3.2 Aikataulutus rytmityspyörällä

Simulointimallissa tuotteiden aikataulutus toteutettiin tuotantoputkittain rytmityspyörää soveltaen. Jokaisessa putkessa puhtaalla rytmityspyörän periaatteilla ohjattiin tuotantoputkien ensimmäistä vaihetta, kuitenkin siten, että tuotantojärjestykset oli määritelty kaikki vaiheet huomioon ottaen. Toisessa vaiheessa tuotteita prosessoitiin samassa järjestyksessä kuin tuotteet valmistuivat ensimmäisestä vaiheesta eli rytmityspyörän järjestystä noudattaen. Tuotantoputkissa 1 ja 2 vaiheessa 2 oli kuitenkin käytettävissä kaksi konetta, joten vaiheen aikataulutuksessa piti myös päättää tuotteiden jakamisesta eri koneiden kesken. Kolmannessa vaiheessa tuotantoputkissa 1 ja 2 pyrittiin vaiheen 2 mahdollisesti eriytyneiden tuotevirtojen takia minimoimaan vaiheen asetuksia, eli useissa tapauksissa kokoamaan tuotevirrat uudelleen vaiheen 1 järjestykseen. Kooste eri tuotantoputkien eri vaiheiden aikataulutusmenetel-



Kuva 13: Lohkokaavio simulaatiomallin rakenteesta

mistä on esitetty taulukossa 14. Myöhemmin aikataulutuspoliitikoista käytetään merkintää $(X_1 \times X_2, Y)$, missä X_1 merkitsee tuotantoputken 1 vaiheen 1 minimisarjakokoa, X_2 tuotantoputken 2 vaiheen 1 minimisarjakokoa, sekä Y aikataulutusjakson pituutta.

Suurin osa tuotantoputken 1 tuotteista oli pienivolyymisiä tuotteita. Vaiheen 1 aikataulutukseen käytettiin High-Mix Rhythm Wheel -menetelmää. Päätökriteerinä tuotteen ottamisesta tuotantoaikatauluun kaikille tuotteille niiden kerääntynyt kysyntä, eli aiemmin esiteltyä Minimum Make Quantities (MMQ) -periaatetta. Mikäli tuotteelle oli kertynyt asiakastilauksia yhteensä vähintään X_1 kappaletta, kaikki asiakastilaukset aikataulutettiin tuotantoon. Minimisarjakoolla pyrittiin vähentämään asetusajojen suhdet-

Tuotantoputki	Vaihe	Aikataulusmenetelmä
1	1	High-Mix Rhythm Wheel, Kaikille tuotteille minimisarjakoko X_1
	2	Jos sarjakoko > 4 erää, jaetaan sarja molemmille vaiheen koneille, muuten koko sarja samalle koneelle vaihtojen minimoimiseksi
	3	Minimoidaan vaihdot
2	1	High-Mix Rhythm Wheel, muille kuin tuoteperheen A tuotteille minimisarjakoko X_2
	2	Tuotteet jaettu etukäteen vaiheen 2 resursseille, joissa erät prosessoidaan vaiheen 1 valmistumisjärjestyksessä
	3	Minimoidaan vaihdot
3	1	Breathing Rhythm Wheel jokaiselle resursille, valmistettavien erien määrä asiakaskysynnän mukaan
	2	Breathing Rhythm Wheel, joka kokoaa vaiheen 1 valmistuneet erät järjestykseen
	3	Vaiheen 2 valmistumisjärjestyksessä

Kuva 14: Kooste tuotantoputkien vaiheiden aikataulusmenetelmistä

ta prosessiaikoihin, jotta tuotantoputken erämääräinen kapasiteetti vastaisi keskimääräistä asiakaskysyntää. Pienivolyyminen tuotteiden kohdalla minimisarjapituutta ei kuitenkaan voitu asettaa kovin korkeaksi, jottei vain pari kertaa vuodessa tilattavien tuotteiden toimitusaika venyisi kohtuuttoman pitkäksi.

Tuotantoputken 1 vaiheessa 2 oli käytävissä kaksi identtistä konetta, joille tuotteita voitiin aikatauluttaa. Yksittäisen erän läpäisyajan minimoimiseksi ja vaiheen 3 tasaiseksi kuormittamiseksi pitkät tuotantosarjat päätettiin jakaa molemmille koneille, kun sarjan pituus oli yli 4 erää. Lyhyempiä sarjoja ei haluttu jakaa molemmille koneille vaihtojen minimoimiseksi.

Tuotantoputken 1 vaiheessa 3 osa prosessoitavista tuotteista tuli tuotantoputken 3 vaiheesta 2. Tuotantoputken 3 tuotteet päätettiin aikatauluttaa vaiheessa 3 ensimmäisinä, sillä nämä tuotteet valmistuivat ensimmäisinä tuotantoputken 3 toisesta vaiheesta. Putken 1 tuotteet aikataulutettiin tämän jälkeen heuristisella aikataulusalgoritmillä, joka pyrki minimoimaan koneen asetusajoja. Koska vaiheesta 2 erää valmistui kahdelta koneelta, saattoi erä joutua vaiheessa 3 odottamaan edellisen tyyppisten tuotteiden sarjan valmistumista ennen prosessointiaan.

Tuotantoputken 2 ensimmäistä vaihetta ohjattiin High-Mix Rhythm Wheel-periaatteella. Tuotantoputken 2 tuotteiden kokonaisvolyyminen noin puolet kuului priorisoidun tuoteryhmän A tuotteisiin. Tuoteryhmän tuotteita oli kuitenkin useita kymmeniä tuotenimikkeitä, minkä takia joidenkin yksittäisten nimikkeiden menekki oli hyvin pientä. Strategisen merkityksen ja

suuren nimikemäärän vuoksi jokaisessa aikataulutussyklissä tuotantoon päätettiin valita kaikki tuoteperheen A tilatut erät ja asettaa muille tuotteille Minimum Make Quantities -periaatteen mukaisesti minimisarjakokovaatimus tuotantoputken 1 vaiheen 1 tapaan. Lisäksi tuoteryhmän A erät aikataulutettiin aina tuotantosyklin alkuun. Tuotantoputken tuotteiden suurien volyymien vuoksi minimisarjapituus asetettiin useissa simulaatioissa putken 1 minimisarjapituutta pidemmäksi.

Tuotantoputken 2 toisessa vaiheessa tuotteet jakaantuivat kahdelle eri koneelle prosessoitaviksi tuotantorajoitusten mukaisesti. Tuotteiden jakautuminen eri koneille oli pyritty ottamaan huomioon vaiheen 1 HRW:ssä siten, että eriä valmistuisi keskimäärin melko tasaisesti molemmille vaiheen 2 koneille ja niin, että asetusaajat minimoituisivat koneilla.

Tuotantoputken 2 kolmannessa vaiheessa aikataulutus tehtiin käyttäen samaa algoritmia kuin putken 1 kolmannessa vaiheessa.

Tuotantoputken 3 ensimmäisessä vaiheessa jokaisen koneen tuotanto aikataulutettiin Breathing Rhythm Wheel -periaatetta käyttämällä siten, että valmistettävien tuotteiden määrä määrittyi tulleiden tilausten perusteella. Tuotantoputkessa oli vain pieni määrä tuotteita, ja nykyinen laitekapasiteetti vastasi asiakaskysyntää ilman minimisarjapituuksiakin. Näistä syistä tuotantoputken 3 aikataulutetusparametrejä ei vaihdeltu simulaatioiden aikana. Vaikka vaiheessa 2 erät aikataulutettiin yhdelle resurssille, vaiheessa 1 ei koordinoitu eri koneiden tuotantoa, mikä käytännössä tarkoitti jonon keräämistä vaiheen 2 eteen. Todellista systeemiä aikataulutettaessa resurssien tuotannot voitaisiin kuitenkin ajastaa alkamaan siten, että erät valmistuisivat juuri ennen niiden vuoroa vaiheessa 2.

Tuotantoputken 3 vaiheessa 2 eri resursseilta vaiheessa 1 valmistuneet erät aikataulutettiin yhdelle resurssille käyttäen ennalta määrättyä tuotantojärjestystä. Tuotantojärjestystä määritettäessä oli pyritty huomioimaan tietyn tuotteen siirtyminen vaiheessa 3 tuotantoputken 1 resurssille siten, että tuotteen valmistus ajoitettiin ensimmäiseksi.

Tuotantoputken 3 vaiheessa 3 erät aikataulutettiin valmistumisjärjestyksensä prosessoitavaksi koneelle.

4.3.3 Stokastiset dominanssit

Simulaatioiden tuottamista aikataulutuspoltiikkujen ja jaksonpituuksien varastotarpeiden diskreeteistä kertymäfunktioista laskettiin teoriaosuudessa esitelyjen kaavojen (1) ja (2) periaatteiden mukaisesti ensimmäisen ja toisen

asteen stokastiset dominanssit. Kaavoista poiketen varastotarpeet positiivisina arvoina tulkittiin hyödyn sijasta kustannuksiksi, mistä johtuen kertymäfunktioiden vertailuissa pienempi kuin ('<') ja suurempi kuin ('>') merkkien suuntaa piti kaavoissa muuttaa. Työssä ensimmäisen asteen stokastisten dominanssien laskemiseen käytettiin siis versiota

$$X >_{s1} Y \iff F_X(n) \geq F_Y(n) \forall n \in R, \exists n F_X(n) > F_Y(n) \quad (3)$$

ja toisen asteen stokastisten dominanssien laskemiseen versiota

$$X >_{s2} Y \iff \int_{-\infty}^n [F_X(k) - F_Y(k)] dk \geq 0 \forall n \in R, \exists n \int_{-\infty}^n [F_X(k) - F_Y(k)] dk > 0. \quad (4)$$

5 Tulokset

Tulokset kerättiin aiemmin kuvatulla Matlab simulointimallilla käyttäen tuotteille ja koneille määritettyjä lähtötietoja. Simulointimallilla arvottiin yhteensä 5000 erilaista kysyntäskenaariota 300 työpäivän ajanjaksolle. Simuloimalla mallinnettiin kahtatoista tuotantoputkien minimierämäärien suhteen erilaisista aikataulutuspoliittikkaa yhdeksällä erimittaisella aikaperusteisella aikataulutuskajaksolla. Lisäksi simuloitiin yhdeksää erimittaista erämääräperusteista aikataulutuskajaksota ilman minimisarjakokovaatimuksia.

Simuloinneilla pyrittiin selvittämään riittävän tuotantokapasiteetin toteuttavat aikataulutuspoliittikat sekä vertailemaan poliittikkoja keskenään niiden varmuusvarastotarpeiden suhteen. Tuotantokapasiteettia arvioitiin poliittikkojen keskimääräisten toimitusaikojen kuvaajista sekä koneiden kuormituskuvaajista, ja varmuusvarastotarpeita stokastisten dominanssien avulla.

5.1 Kapasiteettitarkastelu

Tuotantosysteemin yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on sen kapasiteetti suhteessa asiakaskysyntään. Käytännössä tuotantoa ei voida pitkällä aikavälillä toteuttaa sellaisten periaatteiden mukaisesti, jotka eivät takaa riittävä tuotantokapasiteettia. Syklisen aikataulutuksen osuudessa todettiin, että tutkittavan tuotantosysteemin kapasiteettiin vaikuttavat erityisesti tuotteiden tuotantojärjestykset sekä tuotantosarjapituudet.

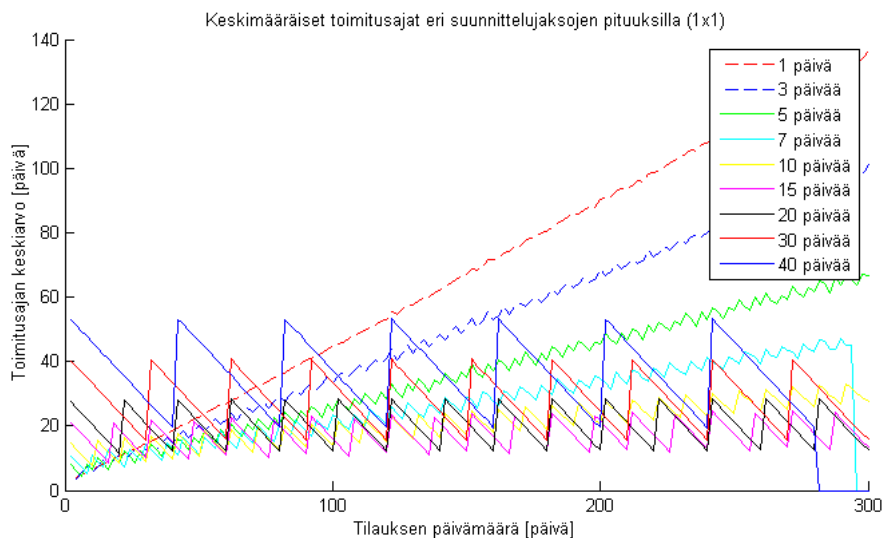
Tässä työssä aikataulutusmenetelmien tuottamia kapasiteetteja tarkasteltiin tilauspäivän mukaisten keskimääräisten toimitusaikojen avulla sekä tutkimala yksittäisten koneiden keskimääräisiä kuormituskuvaajia. Kapasiteetiltään riittävässä systeemissä keskimääräisten toimitusaikojen aikasarjan keskiarvon tulisi pysyä vakiona. Mikäli systeemin kapasiteetti ei keskimäärin riitä, tilausten keskimääräisissä toimitusajoissa tulisi ilmetä nouseva trendi täyttämättömien asiakastilausten kasautuessa tuotantosysteemiin ajan kuluessa.

Systeemin kapasiteetin määrittävät yksittäisten koneiden kapasiteetit ja niiden yhteensovitus. Systeemiin kuuluvien koneiden keskimääräistä kuormitusta tutkittiin tuotantoon ja asetuksiin käytettyjen aikojen prosenttiosuuksina

koko simulointijakson ajasta. Kuormituskuvaajista voidaan myös tarkastella, mitkä koneista muodostavat systeemin todennäköisimmät pullonkaularessurssit. Mikäli jonkin koneen keskimääräinen kokonaiskuormitus on lähes 100 %, voidaan kone tulkita pullonkaulaksi. Pysyvien pullonkaulojen lisäksi systeemiin saattaa syntyä myös hetkellisiä pullonkauloja, mutta näitä ei voida tunnistaa keskimääräisestä kuormituskuvaajasta.

5.1.1 Keskimääräiset toimitusajat

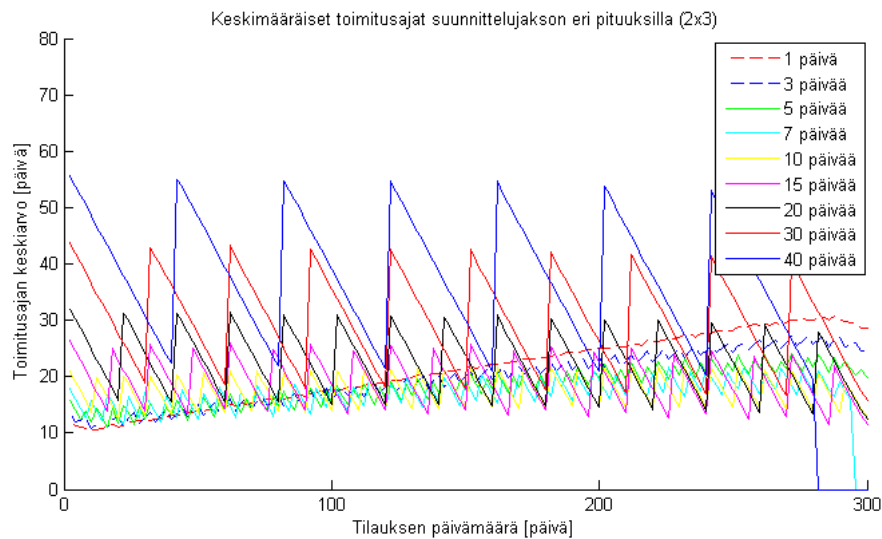
Alla on havainnollistettu keskimääräisiä toimitusaikoja erilaisille aikataulutuspoliitikoille sekä aikataulutussyklin pituuksille kuvissa 15, 16, 17. Kuvassa 15 on esitetty aikataulutuspoliitikkojen (1x1, Y päivää) keskimääräiset toimitusajat eri aikataulutusjaksojen pituuksilla. Kuvasta 15 voidaan nähdä, että poliitikoilla, joilla ei ole minisarjapituuksia, alle 15 päivän mittaisten aikataulutusjaksojen trendi on nouseva. Nouseva trendi tarkoittaa asiakastilausten ruuhkautumista systeemissä. Lyhyiden aikataulutusjaksojen aikana ei ehdi kertyä tilauksia riittävän pitkiksi tuotantosarjoiksi, jotta tuotannon kapasiteetti kattaisi asiakaskysynnän keskimääräisen tason.



Kuva 15: Tuote-erien keskimääräiset toimitusajat tilauspäivämäärän mukaisesti eri aikataulutusjaksojen pituuksilla. Tuotantoputkien aikataulutuksessa ei minisarjapituuksia.

Kuvassa 16 tuotantoputkiin 1 ja 2 on asetettu 2 ja 3 erän minisarjapituusrajoitteet. Minimisarjapituudet nostavat lyhytjaksoisten aikataulutuspoliitikkojen kapasiteettiä niin, että jaksot 10 päivästä alkaen näyttävät sta-

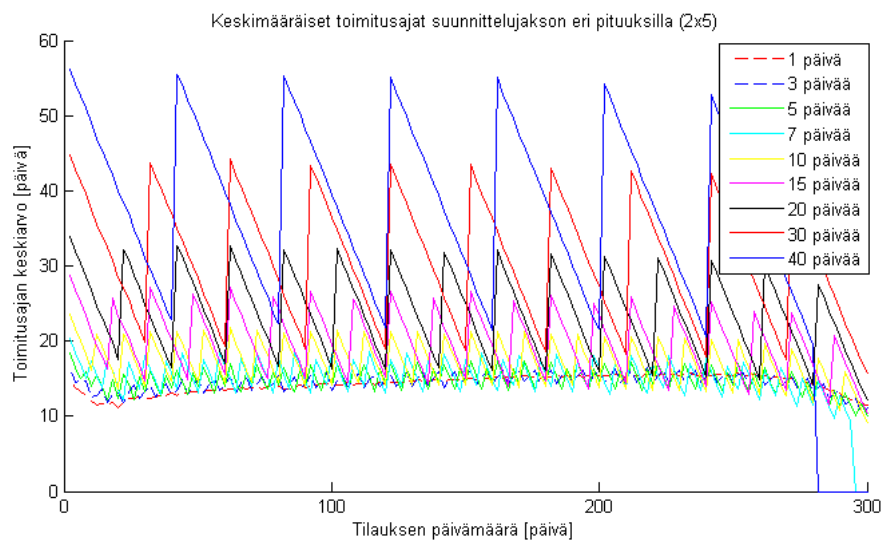
biileilta. Lisäksi minimisarjapituudet vähentävät hajontaa eri aikataulutuskaksojen pituuksien välillä. Sahalaitakuvio kaikissa aikaperusteisissa toimitusaikakuvaajissa johtuu kiinteistä aikataulutushetkistä simulaatioissa. Jakson alussa tilatut tuotteet joutuvat aina odottamaan aikataulutuskakson loppuun ennen niiden aikataulutusta tuotantoon, minkä vuoksi tiettyinä päivinä tilattujen tuote-erien toimitusajat pitenevät.



Kuva 16: Tuote-erien keskimääräiset toimitusajat tilauspäivämäärän mukaisesti eri aikataulutuskaksojen pituuksilla. Tuotantoputken 1 minimivalmistuskoko on 2 erää ja tuotantoputken 2 minimivalmistuskoko on 3 erää.

Kuvassa 17 tuotantoputkiin 1 ja 2 on asetettu 2 ja 5 erän minimisarjapituusrajoitteet. Edellisistä kuvaajista poiketen kaikki, jopa yhden päivän mittaiset, aikataulutuspoliitikat ovat kapasiteetin suhteen stabiileja. Ero kuvan 16 tuloksiin selittyy tuotantoputken 2 suuremmasta minimisarjavaatimuksesta, joka kuvassa 16 oli 3 erää ja kuvassa 17 on 5 erää.

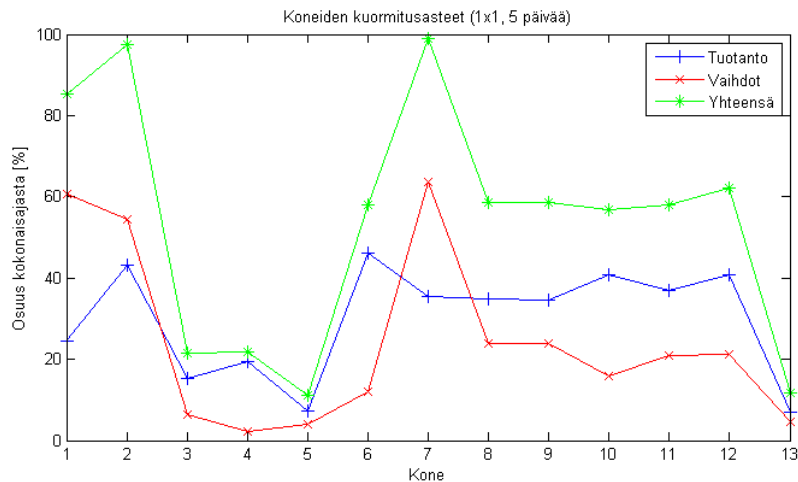
Tuloksista voidaan päätellä yleisen näkemyksen mukaisesti, että kapasiteettimielessä aikataulutuskakson pituuden merkitys vähenee asteittain, kun valmistussarjoille asetetaan suurempia minimipituuksia. Luonnollisesti suurivolyymisten tuotteiden tuotantoputkessa 2 systeemin kapasiteetin stabiiloiva minimisarjavaatimus on pienivolyymisten tuotteiden tuotantoputken 1 minimisarjavaatimusta suurempi.



Kuva 17: Tuote-erien keskimääräiset toimitusajat tilauspäivämäärän mukaisesti eri aikataulutuskajsojen pituuksilla. Tuotantoputken 1 minimivalmistuskoko on 2 erää ja tuotantoputken 2 minimivalmistuskoko on 5 erää.

5.1.2 Koneiden kuormituskuvaajat

Alla on esitetty keskimääräiset kuormituskuvaajat kaikille systeemin koneille politiikoilla (1x1, 5 päivää), (1x1, 15 päivää), (1x5, 15 päivää) kuvissa 18, 19, ja 20. Valitut kuormituskuvat havainnollistavat suunnittelujakson pituuden sekä minimituotantosarjavaatimusten vaikutuksia kuormitukseen. Kuvista voidaan nähdä, että eri politiikoilla konekohtaiset tuotantoon käytetyt ajat pysyvät melko vakioina. Tuotteiden jaolla eri tuotantoputkiin ja eri koneille tuotantoputkien sisällä on siis suuri merkitys koko systeemin kapasiteetin tasapainotuksessa. Suurimmat erot eri politiikkojen välillä ovat asetuksiin käytetyt ajat. Kapasiteetiltaan riittävässä politiikoissa asetusajat ovat kapasiteetiltaan riittämättömiä politiikkoja pienemmät. Käytännössä pienemmät keskimääräiset asetusajat johtuvat pidemmistä tuotantosarjoista tai pidemmän suunnitteluhorisontin mahdollistamista yksittäisistä paremmista aikataulutuspäätöksistä. Huomionarvoista on myös se, että nimenomaan pullonkaularesursseiksi kuvassa 18 muodostuvilla koneilla 1,2, ja 7 erot asetusajoissa ovat merkittävimmät eri politiikkojen välillä. Näiden resurssien aikataulutuksella on siis suurin vaikutus koko systeemin kapasiteettiin.



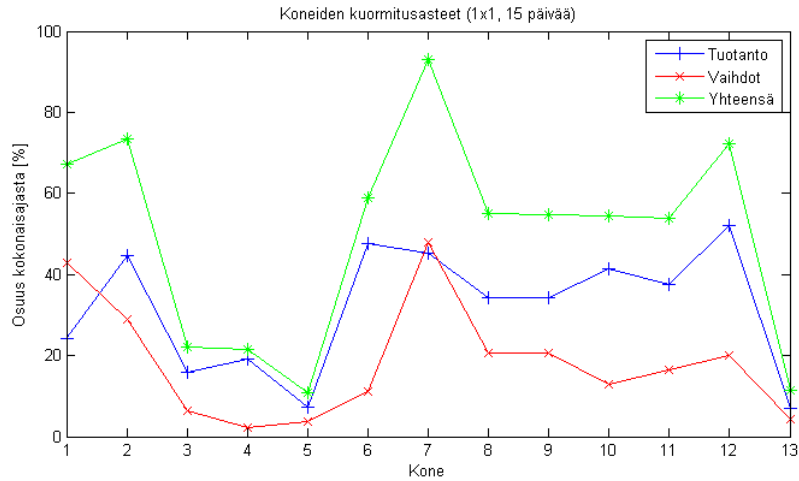
Kuva 18: Tuotantosysteemin koneiden kuormitukset politiikalla (1x1, 5 päivää), joka ei tuota systeemiin riittävää kapasiteettia. Erillisinä käyriä on esitetty tuotantoon, asetuksiin, sekä näiden summaan käytetty aika suhteessa koko simulointijakson aikaan.

Kuvassa 18 on esitetty tuotantosysteemin koneiden keskimääräiset kuormitukset politiikalla (1x1, 5 päivää). Kuvaan on merkitty jokaisen koneen keskimääräinen tuotantoon ja asetuksiin käytetty aika, sekä näiden summa suhteessa koko simulointijakson pituuteen. Toimitusaikakuvasta nähtiin aiem-

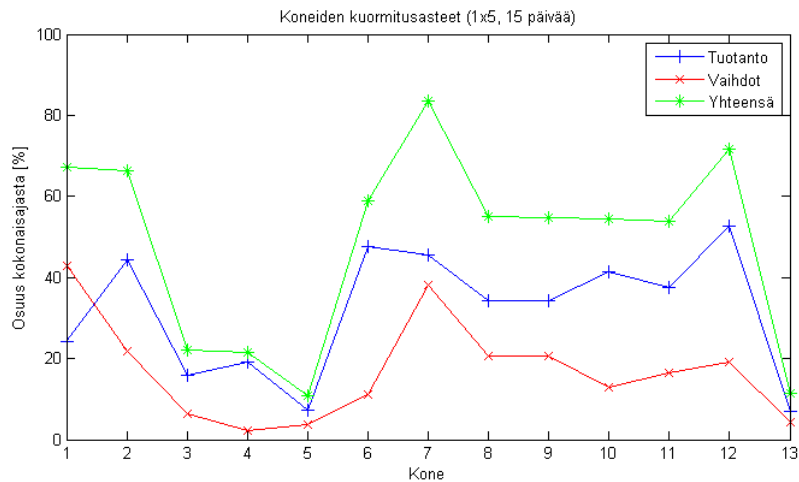
min, ettei politiikka tuottanut riittävää kapasiteettia systeemissä. Kuormituskuvaaajassa kapasiteetin riittämättömyys näkyy koneiden 1, 2, ja 7 kohdalla lähes 100 prosentin kuormituksena. Muiden koneiden kuormitus jää enimmillään noin 60 prosentin tasolle. Tästä voidaan päätellä, että resurssit 1, 2, ja 7 ovat systeemin pullonkaularesurseja valitulla politiikalla. Näiden resurssien kapasiteetti rajoittaa siis aktiivisesti koko systeemin kapasiteettia. Pullonkaulateorian mukaan koko systeemin kapasiteettia voidaan parantaa vain parantamalla systeemin pullonkaulan kapasiteettia.

Kuvassa 19 on esitetty koneiden kuormitukset politiikalla (1x1, 15 päivää). Tämän politiikan tuottama kapasiteetti vastaa keskimääräistä asiakaskysyntää. Kuvasta voidaan nähdä, ettei yhdenkään resurssin kuormitus ollut täyttä 100 prosenttia. Verrattuna edelliseen kuormituskuvaan 18, jossa suunnittelujakson pituus oli lyhyempi, resurssien 1 ja 2 kuormitus on laskenut merkittävästi, ja resurssin 7 kuormitus hieman. Lisäksi resurssin 12 kuormitus on noussut. Pullonkaulamielessä kriittisimmiltä vaikuttavat resurssit 1, 2, 7, ja 12. Näistä resurssin 7 kuormaa voitaisiin käytännössä jakaa muille valmistusvaiheen 2 resursseille (koneet 6-10), sillä vaiheen 2 prosessointi voidaan tehdä monella eri vaihtoehtoisella koneella. Koko prosessin näkökulmasta mahdollisia pullonkauloja esiintyy siis kaikissa kolmessa vaiheessa simuloinnin tulosten perusteella. Tämä havainto vastaa todellisesta tuotantosysteemistä tehtyjä havaintoja, joiden mukaan pullonkaula tuntuu usein siirtyvän eri vaiheiden välillä.

Kuvassa 20 on esitetty kuormituskuvaaaja politiikalla (1x5, 15 päivää), joka tuottaa asiakaskysyntää vastaavan keskimääräisen kapasiteetin. Edelliseen kuvaan 19 verrattuna politiikan suunnittelujakson pituus on sama, mutta suurivolyymisten tuotteiden tuotantoputkeen 2 on pakotettu 5 erän minimivalmistussarjakoko. Minimisarjakoon vaikutus näkyy kuvassa resurssien 2 ja 7 vähentyneinä keskimääräisinä asetusaikoina. Valmistamalla tuotteita vain usean erän sarjoissa voidaan siis vähentää keskimääräisiä asetusaikoja ja siten lisätä koneiden kapasiteettia.



Kuva 19: Tuotantosysteemin koneiden kuormitukset politiikalla (1x1, 15 päivää), joka tuottaa riittävän keskimääräisen kapasiteetin systeemiin. Erillisinä käyriä on esitetty tuotantoon, asetuksiin, sekä näiden summaan käytetty aika suhteessa koko simulointijakson aikaan.



Kuva 20: Tuotantosysteemin koneiden kuormitukset politiikalla (1x5, 15 päivää), joka tuottaa systeemiin riittävän keskimääräisen kapasiteetin. Erillisinä käyriä on esitetty tuotantoon, asetuksiin, sekä näiden summaan käytetty aika suhteessa koko simulointijakson aikaan.

5.2 Varastokysyntöjen tarkastelu

Kapasiteetin lisäksi aikataulutuspoltiikkoja arvioitiin niiden synnyttämien varmuusvarastotarpeiden perusteella. Varmuusvarastot sitovat yrityksen pääomaa ja altistavat valmiiden tuotteiden erääntymisriskille, jos asiakaskysyntä vaihtelee voimakkaasti tai on vaikeasti ennustettavaa. Täten erämääräistä varmuusvarastotarvetta tarkasteltiin kustannuksena. Optimitilanteessa kaikki asiakkaiden tilaukset voitaisiin sovitun toimitusajan puitteissa toimittaa suoraan tuotannosta, jolloin erillisiä varmuusvarastoja ei tarvittaisi.

Varmuusvarastojen tarvetta arvioitiin laskemalla kaikkien tuotteiden päivittäiset erämääräiset varastotarpeet. Yhden erän varastotarve syntyi mallissa aina, kun asiakastilausta ei kyetty valmistamaan asiakkaalle luvattun 60 päivän (42 arkipäivän) toimitusajan puitteissa. Yhden erän varastotarpeen lisäys kohdennettiin kaikille kysyntäskenaarion simulaation päiville luvatus-ta toimituspäivästä erän valmistuspäivään. Näin pitkälle myöhästymiselle pyrittiin mallintamaan lyhyttä myöhästymistä suurempi kustannus.

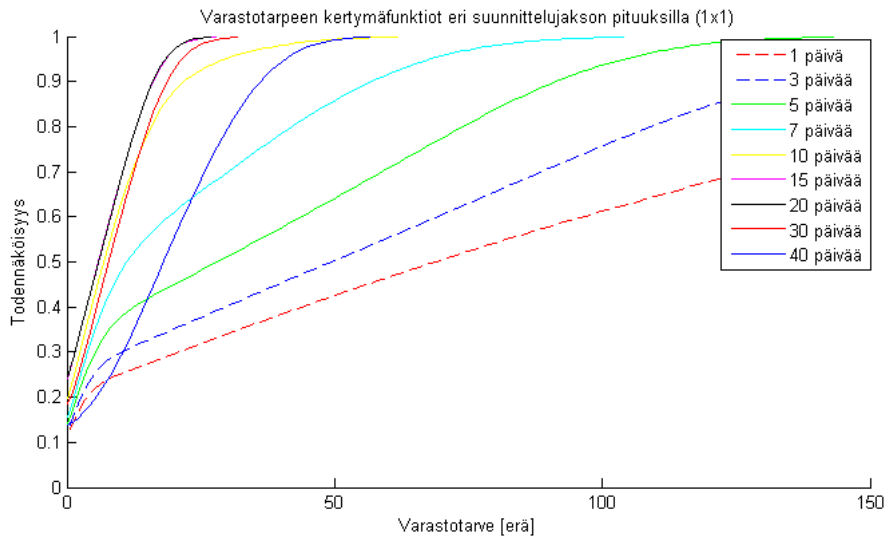
Valmistettavista tuotteista tunnistettiin sekä volyymiltaan että raaka-ainekustannuksiltaan suuri tuoteryhmä (A), jota haluttii pystyä tarkastelemaan muista tuotteista erillisenä kokonaisuutena. Täten kaikkien tuotteiden yhteenlaskettujen varastotarpeiden lisäksi tarkasteltiin erikseen tuoteryhmän A tuotteiden yhteenlaskettuja varastotarpeita. Lisäksi tuoteryhmän A tuotteet asetettiin tuotantoputken 2 aikataulutuspessiissa etusijalle, jotta voitiin tutkia priorisoinnin vaikutusta varmuusvarastotarpeisiin.

Varastotarpeiden vertailuun käytettiin eri kysyntäskenaarioiden päivittäisistä varastotarpeista koostettua varastotarpeiden kertymäfunktioita ja niiden kuvaajia. Kertymäfunktioista voitiin tulkita aikataulutuspoltiikkoihin kytkeytyvien varastotarvejakaumien ominaisuuksia, kuten odotusarvoja ja hajontoja, sekä laskea ensimmäisen ja toisen asteen stokastisia dominansseja. Riittävän kapasiteetin tuottavat politiikat ja niistä lasketut stokastiset dominanssit on esitetty kuvissa 27 ja 28.

5.2.1 Kaikki tuotteet

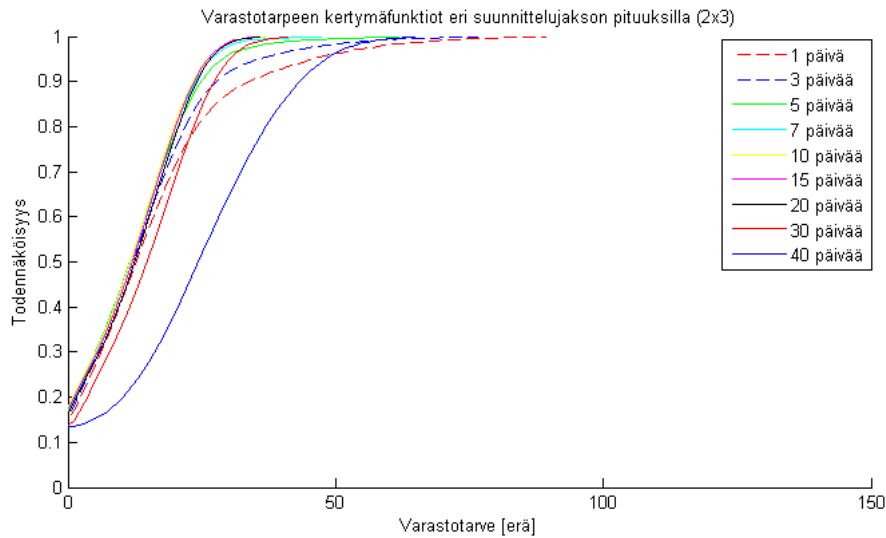
Kuvaajissa 21, 22, 23 on esitetty politiikkoihin $(1 \times 1, Y)$, $(2 \times 3, Y)$ ja $(2 \times 5, Y)$ liittyvät varastotarpeiden kertymäfunktio eri jaksonajoilla Y . Kertymäfunktio on kuvaus varastotarpeen todennäköisyysjakaumasta tietyllä politiikalla. Käyrän arvo y tietyllä varastotarpeella x kertoo simulaatioiden perusteella todennäköisyyden sille, että yksittäisen päivän yhteenlaskettu varmuusvarastotarve on enintään varastotarpeen x suuruinen. Koska varmuusvarastotarve on kustannus, suuret käyrän arvot ovat pieniä mieluisampia.

Kuvassa 21 on esitetty varastotarpeen kertymäfunktioita politiikoilla, joissa kummassakaan tuotantoputkessa ei ole minimisarjavaatimuksia. Kuvasta voidaan nähdä, että kapasiteetiltään riittämättömät, aikataulutussuunnitelman pituudeltaan lyhyet, politiikat erottuvat selvästi loivasti nousevina kertymäfunktioina. Loiva nousu kertoo siitä, että suuret varastotarpeet ovat todennäköisiä näillä politiikoilla. Kuvan parhaita politiikkoja ovat politiikat 15 ja 20 päivän aikataulutussuunnitelmissa. Tätä pidemmät aikataulutussuunnitelmat synnyttävät suurempia varastotarpeita. Esimerkiksi 40 päivän mittaisella suunnittelujaksolla, on luonnollista, ettei merkittävää osaa tilauksista voida toimittaa suoraan tuotannosta alle 42 päivässä.



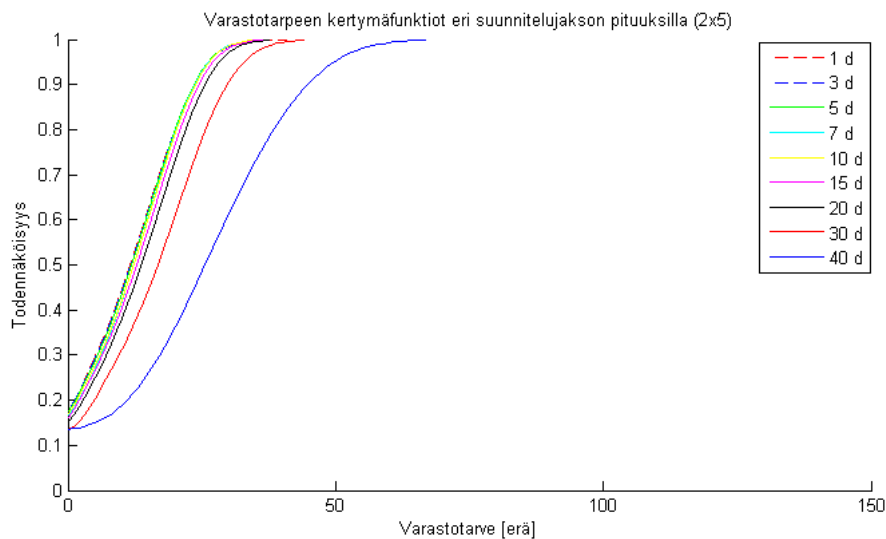
Kuva 21: Päivittäisten varastokysyntöjen kertymäfunktioita eri aikataulutussuunnitelmissa. Tuotantoputkissa 1 ja 2 ei ole minimisarjapituusvaatimuksia.

Kuvassa 22 on esitetty kertymäfunktiot politiikoille, joissa tuotantoputken 1 minimisarjapituus on 1 erä ja tuotantoputken 2 minimisarjapituus 3 erää. Verrattuna kuvaan 21, jossa minimisarjapituuksia ei ollut, hajonta eri kertymäfunktioiden (politiikkojen) välillä on huomattavasti pienempi. Lukuun ottamatta politiikkaa 40 päivän aikataulutuskaksolla, kaikkien politiikkojen kertymäfunktiot muodostavat melko yhtenäisen käyräparven. Poliitikkojen silmämääräinen erottelu ja vertailu on myös edellistä haastavampaa, sillä käyrät eivät erotu selkeästi toisistaan, ja usein risteävät toisiaan.



Kuva 22: Päivittäisten varastokysyntöjen kertymäfunktiot eri aikataulutuskaksien pituuksilla. Tuotantoputken 1 minimivalmistuskoko on 2 erää ja tuotantoputken 2 minimivalmistuskoko on 3 erää.

Kuvassa 23 on esitetty varastotarpeen kertymäfunktiot politiikoille, joissa tuotantoputken 1 minimisarjapituusvaatimus on 2 erää ja tuotantoputken 2 vaatimus 5 erää. Kuvaan 22 käyrät ovat edelleen tiivistyneet yhtenäisemmäksi parveksi. Parvesta erottuvat erillisinä käyriä politiikat aikataulutuksen pituuksilla 30 ja 40 päivää. Erityinen huomio on, että silmämääräisesti politiikat aikataulutuksen pituuksilla 1 ja 3 päivää vaikuttavat kuvan parhailta politiikoilta, kun taas kuvassa 21 nämä politiikat olivat riittämättömän kapasiteettinsa vuoksi huonoimmat politiikat. Suurten minimisarjapituusvaatimusten kanssa lyhyet suunnittelujaksot varmistavat, että tuotantosarja aikataulutetaan tuotantoon heti, kun riittävä määrä tilauksia on kertynyt tietylle tuotteelle.

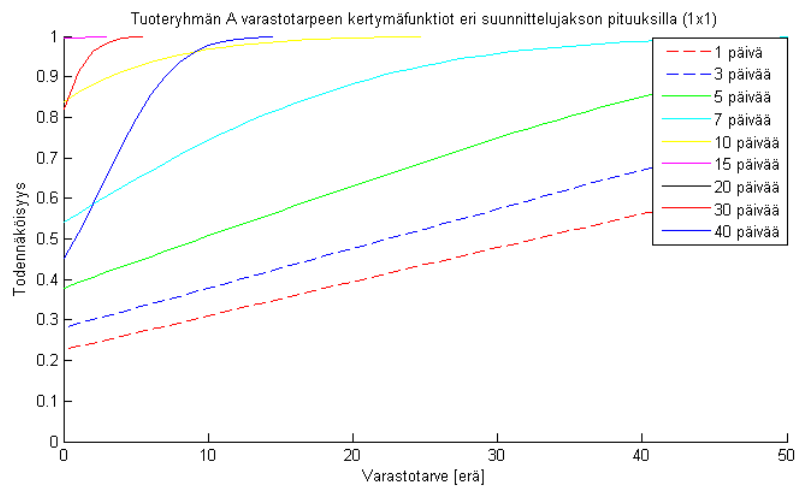


Kuva 23: Päivittäisten varastokysyntöjen kertymäfunktiot eri aikataulutuskantojen pituuksilla. Tuotantoputken 1 minimivalmistuskoko on 2 erää ja tuotantoputken 2 minimivalmistuskoko on 5 erää.

5.2.2 Tuoteryhmä A

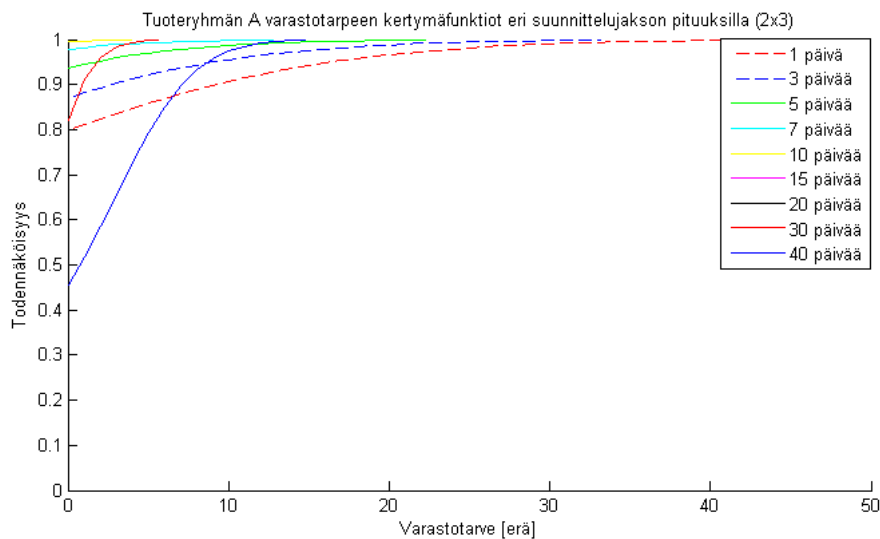
Kuvaajissa 24, 25 ,26 on esitetty politiikkoihin (1x1, Y), (2x3, Y) ja (2x5, Y) liittyvät varastotarpeiden kertymäfunktiot eripituisilla jaksonajoilla tuoteryhmän A osalta. Kaikkien tuotteiden kertymäfunktioihin verrattuna kuvaajissa on siis laskettu vain aikataulutuksessa priorisoidun tuoteryhmän A tuotteiden varastotarpeita. Vaaka-akselin asteikko ulottuu tuoteryhmää A kuvaavissa kuvissa 50 erään kaikkien tuotteiden 150 erän sijasta, jotta pienet erot parhaimpien politiikkojen välillä olisivat näkyviä. Merkittävä huomio verrattuna kaikkien tuotteiden kertymäfunktioihin onkin se, että parhaimpien politiikkojen kertymäfunktiot saavat arvon yksi lähes kaikilla varastotarpeiden tasoilla. Tämä tarkoittaa siis kertymäfunktion määritelmän mukaisesti, että simulaatioissa päivittäinen tarve tuoteryhmän A erien varastoitavalle määrälle oli lähes 100 %:n todennäköisyydellä enintään 0 erää.

Kuvassa 24 on esitetty tuoteryhmän A varastotarpeen kertymäfunktiot politiikoille, joissa ei asetettu minimisarjapituusvaatimuksia tuotantoputkiin. Kuten kaikkien tuotteiden vastaavassa kuvassa 21, kapasiteelitaan riittämättömät, lyhyen aikataulutuskjakson, politiikat erottuvat selkeästi loivasti nousevina käyrinä. Vastaavasti parhaat politiikat ovat politiikat, joiden suunnittelujakson pituudet ovat 15 ja 20 päivää. Nämä kertymäfunktiot saavat käytännössä arvon 100 % kaikilla nolaa suuremmilla varastotarpeen arvoilla.



Kuva 24: Tuoteryhmän A päivittäisten varastotarpeiden kertymäfunktiot eri aikataulutuskjaksoilla. Tuotantoputkien aikataulutuksessa ei pakotettu minimipituuksia valmistussarjoille. Kaikkien tuotteiden vastaavaan kuvaan 21 verrattuna vaaka-akselilla on kuvattu pienempi erämäärä.

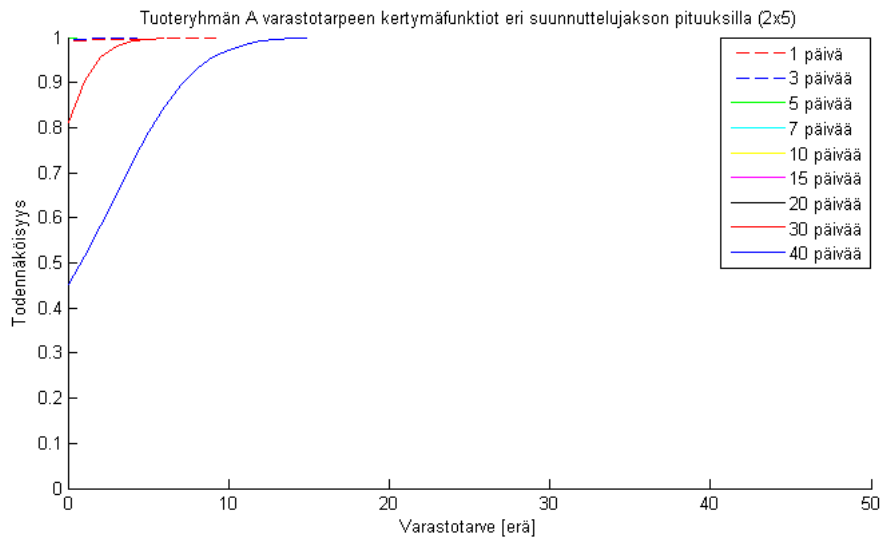
Kuvassa 25 on esitetty kertymäfunktiot politiikoille, joissa tuotantoputken 1 minimisarjavaatimus oli 2 erää ja tuotantoputken 2 vaatimus 3 erää. Verrattuna kaikkien tuotteiden vastaavaan kuvaajaan 22 kaikkien politiikkojen kertymäfunktiot saavat huomattavasti parempia arvoja, mutta käyrien muodot vastaavat paljolti kaikkien tuotteiden kertymäfunktioiden muotoja. Poliitikoilla, joiden suunnittelujakson pituus on 7, 10, 15, tai 20 päivää, ei ole käytännössä ollenkaan tarvetta varmuusvarastoille.



Kuva 25: Tuoteperheen A päivittäisten varastokysyntöjen kertymäfunktiot eri aikataulutuskasjojen pituuksilla. Tuotantoputken 1 minimivalmistuskoko 2 erää ja tuotantoputken 2 minimivalmistuskoko 2 erää. Kaikkien tuotteiden vastaavaan kuvaan 22 verrattuna vaaka-akselilla on kuvattu pienempi erämäärä.

Kuvassa 26 on esitetty tuoteryhmän A varastotarpeiden kertymäfunktiot politiikoille, joiden minimisarjakokovaatimukset olivat 2 erää tuotantoputkelle 1 ja 5 erää tuotantoputkelle 2. Näillä minimisarjavaatimuksilla tuoteryhmän A tuotteita ei tarvitsisi varastoida ollenkaan, paitsi politiikoilla, joiden aikataulutuskasjojen pituus oli 30 tai 40 päivää. Suuri minimisarjakokovaatimus tuotantoputkessa 2 vapauttaa siis keskimäärin tuotantoputken kapasiteettia siten, että priorisoitu tuoteryhmä A pystytään valmistamaan joustavasti asiakkaan toimitusaikavaatimuksen mukaisesti. Kuvaajista 24, 25, ja 26 voidaan lisäksi huomata, että aikataulutuskasjojen 30 ja 40 päivää kertymäfunktiot ovat lähes tarkalleen identtiset minimisarjavaatimuksista riippumatta. Tässä tapauksessa pitkä suunnittelujakson pituus vaikuttaisi vähentävän minimisarjakokovaatimusten merkitystä ja toisaalta määrittävän toimitusai-

kajakauman ominaisuudet.

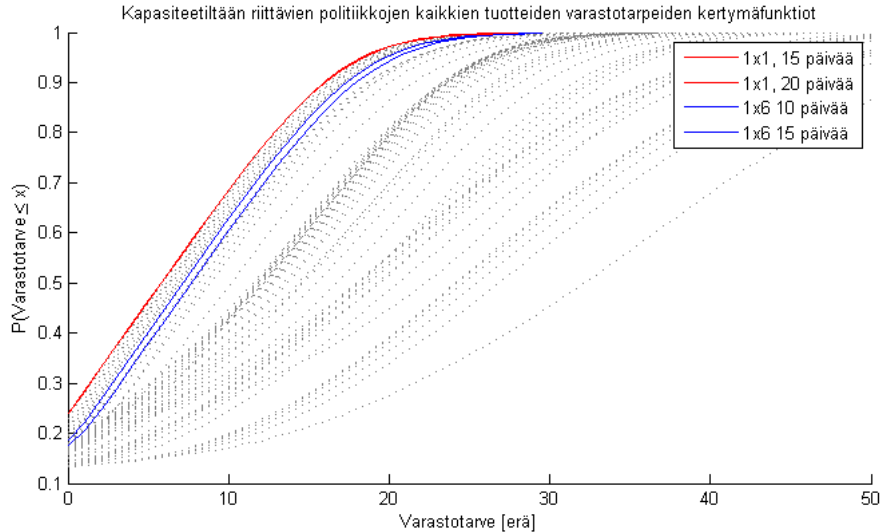


Kuva 26: Tuoteperheen A päivittäisten varastokysyntöjen kertymäfunktiot eri aikataulutuskajaksien pituuksilla. Tuotantoputken 1 minimivalmistuskoko 2 erää ja tuotantoputken 2 minimivalmistuskoko 5 erää. Kaikkien tuotteiden vastaavaan kuvaan 23 verrattuna vaaka-akselilla on kuvattu pienempi erämäärä.

5.2.3 Kertymäfunktioiden stokastiset dominanssit

Asiakaskysyntään nähden riittävän kapasiteetin tuottavien aikatauluspolitiikkojen kertymäfunktioit kaikkien tuotteiden osalta on kerätty kuvaajaan 27. Eri politiikkojen kertymäfunktioit ovat melko tasaisesti hajallaan parhaimpien ja huonoimpien politiikkojen välissä. Näiden kertymäfunktioiden kesken laskettiin ensimmäisen ja toisen asteen stokastiset dominanssit parivertailuina parhaiden politiikkojen analyttiseksi määrittämiseksi. Ensimmäisen asteen stokastiset dominanssit laskettiin käyttämällä kaavaa (3) ja toisen asteen stokastiset dominanssit kaavalla (4).

Kuvaajaan 27 on punaisella merkitty kaksi politiikkaa (1x1, 15 päivää) ja (1x1, 20 päivää), joita yksikään toinen politiikka ei dominoi ensimmäisen eikä toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä, kun kaikkien tuotteiden yhteenlasketut varastotarpeet huomioidaan. Kuvaajaan on lisäksi merkitty sinisellä vertailuksi politiikat (1x6, 10 päivää) ja (1x6, 15 päivää), joita vain tuoteryhmän A varastotarvetta tarkasteltaessa ei ensimmäisen eikä toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä dominoida. Merkityt politiikat on lisäksi esitetty taulukossa 5. Nämä politiikat ovat siten kaikkien tuotteiden ja tuoteryhmän A varastotarpeissa mitattuna parhaita politiikkoja.



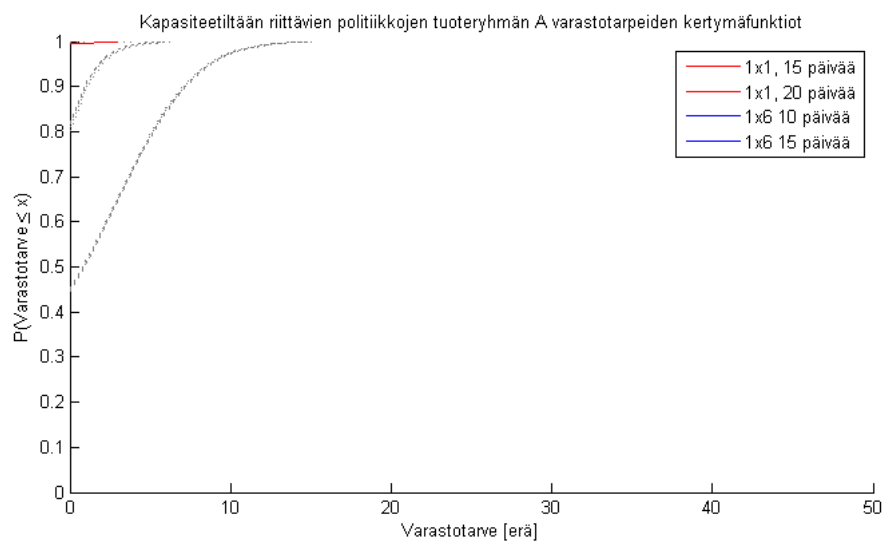
Kuva 27: Kapasiteetiltaan riittävien aikataulusmenetelmien päivittäisten varastotarpeiden kertymäfunktioit kaikkien tuotteiden osalta. Punaisella menetelmät, joita yksikään politiikka ei dominoi ensimmäisen tai toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä.

Taulukko 5: Taulukko politiikoista, joita ei stokastisesti dominoida ensimmäisen tai toisen asteen suhteen. Ensimmäisessä sarakkeessa on merkitty, mikä tuotteiden varastotarpeiden kertymäfunktioita käyttäen stokastiset dominanssit on laskettu.

Tuotteet	Politiikka
Kaikki tuotteet	(1x1, 15 päivää)
Kaikki tuotteet	(1x1, 20 päivää)
Tuoteryhmä A	(1x6, 10 päivää)
Tuoteryhmä A	(1x6, 15 päivää)

Keskimääräiseltä kapasiteetiltaan riittävien aikataulutuspoltiikkojen kertymäfunktioit tuoteryhmän A varastotarpeiden osalta on esitetty kuvaajassa 28. Kuvaajaan on sinisellä merkitty politiikat (1x6, 10 päivää) ja (1x1, 15 päivää), joita yksikään toinen politiikka ei dominoi ensimmäisen eikä toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä vain tuoteryhmän A varastotarpeita tarkasteltaessa. Punaisella on lisäksi merkitty kuvaajaan aiemmin esitetyt kaikkien tuotteiden suhteen dominoimattomat politiikat (1x1, 15 päivää) ja (1x1, 20 päivää). Kuvasta erottuvat selkeästi omina käyrinään aikataulutuskakson pituudeltaan 30 ja 40 päivää olevat politiikat sekä kaikkien muiden piirrettyjen kuvaajien parvi. Parhaiden politiikkojen tapauksessa varastotarvetta tuoteryhmän A tuotteille ei käytännössä ole. Kumpikin kaikkien tuotteiden suhteen dominoimattomista politiikoista (punaisella) sijoittuu parhaiden politiikkojen joukkoon myös vain tuoteryhmän A tuotteita tarkasteltaessa. Sinisellä ja punaisella korostettuja politiikkoja ei voi kuvaajassa 28 erottaa toisistaan.

Yksikään politiikka ei ollut sekä kaikkien tuotteiden että vain tuoteryhmän A tuotteita tarkasteltaessa ei dominoitu. Kuvista 27 ja 28 voidaan nähdä, että taulukossa 5 listatut stokastisesti ei dominoidut politiikat ovat melko hyviä kummallakin mittarilla tarkasteltuna. Erityisesti kaikkien tuotteiden suhteen ei dominoidut politiikat suoriutuivat erinomaisesti myös vain tuoteryhmän A varastotarvetta tarkasteltaessa. Jotta politiikasta voitaisiin antaa yksikäsitteinen analyyttinen suositus, täytyisi määritellä päätöksentekijän hyötyfunktioit sekä kaikkien tuotteiden että tuoteryhmän A tuotteiden suhteen.

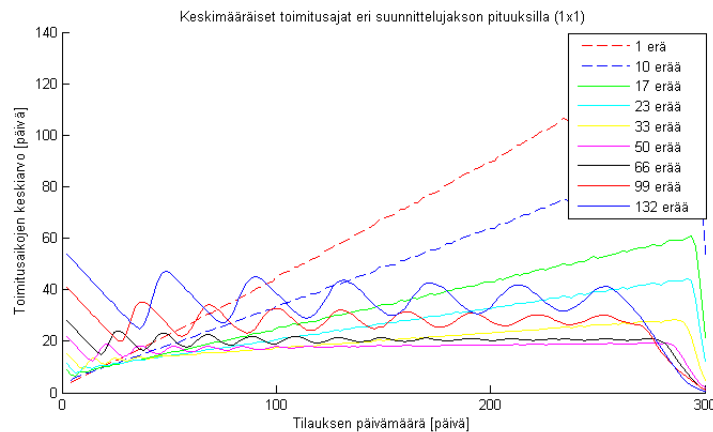


Kuva 28: Keskimääräiseltä kapasiteetiltaan riittävien aikataulusmenetelmien päivittäisten varastotarpeiden kertymäfunktiot tuoteryhmän A osalta. Sinisellä menetelmät, joita ei stokastisesti dominoida ensimmäisen tai toisen asteen mielessä vain tuoteryhmän A osalta ja punaisella kaikkien tuotteiden osalta.

5.3 Erämääräperusteiset jaksot

Erämääräperustaisia aikataulutuskasjoja verrattiin aikaperusteisiin jaksoihin ilman minimisarjapituusvaatimuksia. Lähtötietojen pohjalta päivittäiseksi keskimääräiseksi erämääräiseksi kysynnäksi laskettiin 3,3 erää. Täten aikaperustaisia kasjoja vastaaviksi erämääräperustaisiksi jaksopituuksiksi valittiin 1, 10, 17, 23, 33, 50, 66, 99, ja 132 erää. Tarkempaan tarkasteluun valittiin jaksot 50 ja 66 erää, jotka vastaavat aiemmin kaikkien tuotteiden osalta ei dominoiduiksi politiikoiksi määritettyjä politiikkoja (1x1, 15 päivää) ja (1x1, 20 päivää).

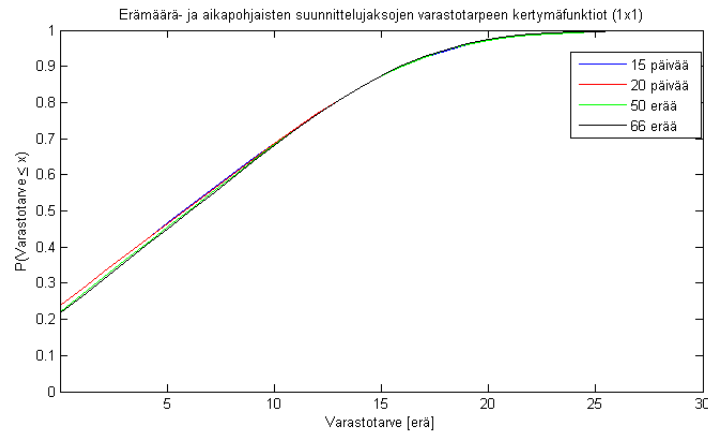
Kuvassa 29 on esitetty toimitusaikakuvaaja politiikoista (1x1, Y) erimittaisilla eräperusteisilla aikataulutuskasjoilla systeemin kapasiteetin tutkimiseksi. Kuvasta voidaan nähdä, että kuvaan 15 verrattuna keskimääräisten toimitusaikojen syklisyys vaimenee. Tämä johtuu siitä, että (toisin kuin aikaperusteisessa mallissa) erämääräperusteisessa mallissa yksittäisten aikataulutuskasjojen pituudet ajassa mitattuna vaihtelevat. Kapasiteettimielessä jaksopituuden määrittävällä ei näytä olevan suurta merkitystä, riittävän kapasiteetin rajana on noin 50 erän aikataulutaminen kerrallaan, mikä vastaa kuvan 15 noin 15 päivän aikataulutussykliä.



Kuva 29: Keskimääräisten toimitusaikojen kehitys simuloinnin aikana erilaisilla erämääräperusteisilla aikataulutuskasjojen pituuksilla.

Kertymäfunktiokuvaajassa 30 on esitetty kaikkien tuotteiden osalta valikoitua aika- ((1x1, 15 päivää) ja (1x1, 20 päivää)) ja eräperusteiset ((1x1, 50 erää) ja (1x1, 66 erää)) aikataulutuspoltiikat. Kuvan perusteella aikataulutuspoltiikojen välillä ei havaittu merkittäviä eroja. Stokastisia dominansseja kaikkien tuotteiden suhteen tutkittaessa todettiin, että kolme muuta ver-

taitua politiikkaa dominoivat politiikkaa (1x1, 60 erää) toisen asteen stokastisen dominanssin mielessä Muita ensimmäisen tai toisen asteen stokastisia dominansseja ei todettu politiikkojen välillä.



Kuva 30: Kertymäfunktiot valituista aika- ja eräperusteisista aikataulutuksen menetelmistä kaikkien tuotteiden osalta.

Työn tulosten perusteella erämäärä- ja aikaperustaisten aikataulutuskäytäntöjen välille ei voitu tehdä eroa. Kaikkien tuotteiden varastotarpeita tarkasteltaessa kertymäfunktioiden välillä ei ollut lainkaan ensimmäisen asteen stokastisia dominansseja, ja vain yksi toisen asteen stokastinen dominanssi. Kuvasta 29 havaittu toimitusaikojen heilahtelun tasoittuminen johtuu eri skenaarioiden keskiarvoistamisesta, yksittäisessä skenaariossa toimitusajoissa havaittaisiin edelleen jaksottainen vaihtelu toimitusajassa. Aikaperustaisen jaksotuksen etuna on tuotantosykliden aloituksen ennustettavuus, mikä voi linkittyneessä toimitusketjussa olla suuri etu.

6 Tarkastelu ja johtopäätökset

Työn tavoitteena oli arvioida annetun tuotantosysteemin edellytyksiä toimia tuotantoputkimallisissa tilauksesta valmistaminen (MTO) –periaatetta hyödyntäen. Tuotantosysteemin kapasiteettia arvioitiin keskimääräisten toimitusaikojen ja kuormituskuvaajien avulla, ja asiakastilausten ajallaan täyttämistä varmuusvarastotarpeiden kertymäfunktioiden avulla. Varmuusvarastotarpeita tarkasteltiin sekä kaikkien tuotteiden että erikseen määritellyn tuoteryhmän A näkökulmasta.

Tulosten perusteella tuotanto on kapasiteettimielessä mahdollista järjestää esitellyn tuotantoputkimallin mukaisesti. Eri tuotantoputkien minimivalmistussarjakokoja ja suunnittelujakson pituutta säätämällä voitiin vaikuttaa koko systeemin kapasiteettiin siten, että kapasiteetti keskimäärin vastasi toteutunutta asiakaskysyntää. Työssä ei tarkasteltu eri tuotantoputkien kapasiteetteja ja kuormituksia erikseen, eikä vaihtoehtoisia tuotantoputkijakoja tutkittu.

Tilauksesta valmistuksen edellytykset täyttyivät osittain. Keskimääräisiä toimitusaikojen tarkastelemalla voitiin todeta, että sopivilla aikataulutuspoliitikoilla valmistuksen toimitusaika voitiin säätää asiakkaan vaatimaa 42 päivän toimitusaikaa lyhyemmäksi. Varastotarpeiden kertymäfunktioista sen sijaan voitiin todeta, ettei millään testatulla politiikalla voitu täysin vastata asiakaskysynnän muutoksiin kaikkien tuotteiden osalta, vaan asiakastilausten ajallaantäyttämiseen olisi tarvittu varmuusvarastoja. Systeemin mallissa tuotantokapasiteettiin voitiin vaikuttaa käytännössä vain tuotejärjestyksellä ja tuotantosarjojen pituudella eikä simulointien perusteella kapasiteetti pysynyt joustamaan toimitusaikavaatimusten mukaisesti.

Tuoteryhmän A varastotarpeita tarkasteltaessa todettiin, ettei parhaiden politiikkojen kohdalla erillisiä varmuusvarastoja tuoteperheen A osalta olisi käytännössä koskaan tarvittu. Tämä osoitti, että osaa tuotteista olisi mahdollista valmistaa tilauksesta jos niiden valmistusta priorisoitaisiin tuotannon aikataulutuksessa. Tilauksesta valmistaminen tarkoittaisi valittujen tuotteiden osalta varastotasojen pienenemistä tai poistumista kokonaan. Tällöin kuitenkin tilauksesta valmistettavien tuotteiden vaatiman tuotantokapasiteetin vaihtelujen puskurina tulisi toimia saman tuotantoputken muiden tuotteiden tuotantokapasiteetti, mikä todennäköisesti johtaisi tarpeeseen kasvattaa näiden joustamaan joutuvien tuotteiden varastotasoja.

Stokastisten dominanssien perusteella parhaimmiksi aikataulutuspoliitikoiksi todettiin politiikat (1x1, 15 päivää) ja (1x1, 20 päivää) kaikkien tuotteiden varastotarpeiden osalta ja politiikat (1x6, 10 päivää) ja (1x6, 15 päivää) tuoteryhmän A tuotteiden osalta. Ensimmäisen asteen stokastisia dominansseja laskettaessa päätöksentekijän preferensseistä ei tarvinnut olettaa muuta kuin pienien varastotasojen suosiminen ja odotusarvoisen hyödyn maksimointi. Aikataulutuspoliitikoista useamman kriteerin suhteen valittaessa päätöksentekijän kriteerikohtaisia preferenssejä tulisi kartoittaa tarkemmin yksiselitteisen suosituksen antamiseksi. Käytännössä tulisi siis määrittää, suosittaanko hyvin pientä parannusta tuoteryhmän A osalta, vai merkittävämpää parannusta kaikkien tuotteiden osalta.

Toimitusaikavaatimusten täyttämiseksi yksi vaihtoehto olisi tilausvalmistuksen tilauspisteen siirtäminen tuotantoketjussa alavirtaan (tuotannon aloituksen sijasta), jolloin tuotannon toimitusaika tilauspisteestä asiakkaalle lyhenisi. Tällöin tilauspiste kannattaisi sijoittaa juuri ennen yksilöiviä työvaiheita varastonimikkeiden määrän minimoimiseksi. Vaiheesta 1 vaiheeseen 2 siirryttäessä erilaisten tuotteiden määrä kasvaa merkittävästi, mutta vaiheesta 2 vaiheeseen 3 siirryttäessä ei enää. Täten mahdollinen uusi tilauspiste voisi olla vaiheiden 1 ja 2 välissä. Tällöin huomioon pitäisi kuitenkin ottaa myös tuotteiden säilyvyys välivarastossa.

Saatujen tulosten perusteella voitaisiin tehdä pienen riskin kokeita oikeiden tuotteiden valmistuksen ohjaamiseksi imuohjatusti ja tuotantosyklejä hyödyntäen. Erittäin tiukkojen toimitusvarmuusvaatimusten vuoksi ohjausperiaatteita ei todennäköisesti kannattaisi muuttaa laajalti ilman mallin käytännön validointia. Kokeita varten tulisi tuoteportfoliota analysoida tarkemmin kokeeseen sopivien tuotenimikkeiden tunnistamiseksi. Lisäksi kokeita voitaisiin tehdä hallitusti tuotantoketjun osa kerrallaan, esimerkiksi aloittaen pienivolyymisestä tuotantoputkesta 3, koko tuotantoketjun sijaan. Ennen muutoksia tulisi myös määrittää yksityiskohtaisesti mittarit ja tavoitteet, joiden mukaisesti tuotannonsuunnittelun ja -ohjauksen periaatteita kehitettäisiin.

Tulosten kriittisen tarkastelun kannalta on olennaista pohtia käytettyjen mittareiden merkitystä todellisessa tuotantoympäristössä sekä perehtyä syvemmin tulosten oletuksina olleisiin stokastisiin kysyntäprosesseihin ja tuotantoputkijakoihin. Mittareiksi pyrittiin valitsemaan tilauksesta valmistuksen toimintaa ja edellytyksiä kuvaavia suureita. Aikataulutusmenetelmiä voitaisiin kuitenkin haluta arvioida monipuolisemmilla kriteereillä, kuten esimerkiksi asetusaikojen, yksittäisten erien läpäisyajkojen tai uudelleenaikataulutuksen aiheuttamien toimitusaikamuutosten suhteen. Lisäksi työssä ei mallinnettu nykyistä aikataulutuskäytäntöä eivätkä tutkimuksessa käytetyt mitta-

rit vastaa nykyisiä tuotannosuunnittelun mittareita, joten tutkittujen politiikkojen suoriutumista on vaikea verrata nykytilanteeseen. Kysyntäprosessin oletettiin mallissa noudattavan Poisson-prosessia. Todellisuudessa yksittäiset asiakkaat saattavat kuitenkin tilata usean erän verran tuotteita kerrallaan, mikä voimistaisi eroja yksittäisten päivien kysyntöjen välillä. Tällaista useiden erien tilaamista voitaisiin mallintaa määrittämällä omat todennäköisyysjakaumat tilauksille ja tilausten ko'oilte. Näiden jakaumien estimointi vaatisi kuitenkin yksityiskohtaista tietoa toteutuneista tilauksista. Tuotantoputkijaolle esitettiin työssä perustelut, mutta simulaatiomallin toimintaa erilaisilla tuotantoputkijaoilla ei tutkittu. Työssä ei myöskään tarkasteltu erikseen eri tuotantoputkien kapasiteettien ja kysyntöjen käyttäytymistä. Kuitenkin kuormituskuvaajia tarkastelemalla voitiin tunnistaa muutamia mahdollisia pullonkauloja, joiden kuormaa voitaisiin jatkossa jakaa muille koneille tuotantoputkijakoa tai putkien sisäistä allokointia muuttamalla.

Työn suurimmat laskennalliset haasteet kohdistuivat simulointimallin muistin hallintaan ja laskenta-aikaan. Erilaisten tuotekohtaisten päivittäisten ja skenaariokohtaisten tietojen tallentaminen vaati melko paljon muistia. Skenaarioiden määrän lisäämiseksi yksittäisten skenaarioiden tietoja ei voitu säilyttää. Aikataulutusalgoritmeiksi valittiin laskennallisesti verrattain kevyitä algoritmeja, jolloin simulointien laskentajat pysyivät maltillisina. Aikataulutaminen monimutkaisemmilla ja tarkemmilla algoritmeilla parantaisi mahdollisesti mallin ennustamaa kapasiteettia, mutta lisäisi myös laskenta-aikaa. Työn tavoitteena oli kuitenkin tutkia edellytyksiä toimia Rhythm Wheel -periaatteiden mukaisesti, jolloin lähtökohtaisestikin pyritään ennemminkin selkeään ja yksinkertaiseen aikataulutusmenetelmään kuin absoluuttisesti optimaaliseen tuotantoaikatauluun.

Tulosten tarkkuutta voitaisiin hieman parantaa lisäämällä arvottavien kysyntäskenaarioiden määrää. Koska simulointimallin tulokset ovat luonteeltaan päivittäisen päätöksenteon sijasta strategista päätöksentekoa tukevia, voisi useidenkin päivien pituinen laskenta-aika olla hyväksyttävä koko simulointimallille. Virheen pienentäminen kysyntäskenaarioita nykyisestä määrästä lisäämällä ei ole työssä tulosten käytäntöön siirtämisen kannalta olennaisinta. Tätä olennaisempaa on mallissa tehtyjen oletusten, kuten vakioiden tuotanto- ja asetusajkojen, ja niiden vaikutusten ymmärtäminen sekä kommunikointi mallin tai tulosten parissa työskentelevien kanssa.

Työssä käytettyjen aikataulutusalgoritmien suoriutumista varmuusvarastotarpeiden suhteen voitaisiin melko yksinkertaisesti parantaa siten, että pitkissä tuotantosarjoissa yhden tuoteryhmän erien aikataulutamisessa otettaisiin asetusajkojen lisäksi huomioon erien tilauspäivämäärät. Tilanteissa, joissa

yhden tuoteryhmän sisällä erien keskinäisellä järjestyksellä ei ole vaikutusta asetusaikeihin, voitaisiin ensimmäisenä tilatut erät aikatauluttaa ensimmäiseksi tuoteryhmän valmistussarjaan. Työssä käytetyssä algoritmossa tuotteille määriteltiin etukäteen kiinteä valmistusjärjestys asetusaikeiden optimoimiseksi. Oletettavasti tilauspäivämäärien huomioiminen olisi merkityksellisintä priorisoitaville tuotteille (työssä tuoteryhmä A), joita pyritään tuottamaan ilman tarvetta varmuusvarastoille. Tilauspäivämäärien huomioiminen aikataulutuksessa on myös oletettavasti sitä merkityksellisempää, mitä pidempi politiikan suunnittelujakso on.

Työssä luotua simulointimallia voitaisiin sellaisenaan, vain lähtötietoja muuttamalla, käyttää erilaisten tulevaisuuden skenaarioiden mallintamiseen. Vaihtokuvia systeemin kapasiteettiin ja toimitusaikoihin voitaisiin arvioida esimerkiksi: (i) muuttamalla tuotteiden tai koneiden asetusaikeja, (ii) käyttämällä erilaista tuoteportfoliota, tai (iii) muuttamalla tuotteiden kysyntäennusteita. Asetusaikojen muuttamalla (i) voidaan mallintaa joko yksittäisten tuotteiden ja koneiden asetusaikeiden muutoksia tai asetusaikeiden satunnaisuutta. Asetusaikojen lyhentäminen nostaa systeemin kapasiteettia ja mahdollistaa tuotteiden valmistamisen keskimäärin lyhyemmissä sarjoissa. Esimerkiksi asetusaikeiden lyhentämiseen tähtäävän tuotannon kehitysprojektin tulosten vaikutuksia koko systeemiin voidaan arvioida simuloimalla tuotantoa ja toimituksia uusilla oletetuilla asetusajoilla. Asetusaikojen hajonnan vaikutusten tutkimiseksi voitaisiin myös kohtuullisilla muutoksilla suunnitella koeasetelma, jossa tuotteiden ja koneiden asetusaikeja arvottaisiin simulointimallissa kysyntäskenaarioiden tapaan. Tällöin voitaisiin selvittää hajonnan vaikutusta varmuusvarastotarpeisiin. Erilaisia tuoteportfoliota (ii) voidaan syöttää simulointimalliin yksinkertaisesti. Suppeampaa portfoliota voidaan mallintaa keskittämällä kysyntää pienemmälle joukolle tuotteita kokonaiskysynnän pysyessä vakiona. Laajempaa portfoliota tai uusia tuotteita voidaan simuloida lisäämällä tuotteita tuotantoaika- ja asetusaikeamatriiseihin sekä määrittämällä tuotteille tuotantoaika- ja niiden paikka tuotantoaika- ja toimitusjärjestyksessä. Nykyistä laajempi tuoteportfolio tarkoittaisi todennäköisesti keskimäärin useampia pitkiä vaihtoja, mikä näkyisi tarpeena kasvattaa kapasiteettia valmistamalla pidempiä sarjoja. Kysyntäennusteiden (iii) tasoa muuttamalla voidaan tutkia, miten tuotantosysteemin kapasiteetti vastaa erilaisia kysynnän tasoja. Kysynnän intensiteettiparametrejä muuttamalla voitaisiin tutkia esimerkiksi, miten viiden vuoden päähän ennustettu myynti vaikuttaisi nykyisen tuotantosysteemin toimintaan.

Työtä voitaisiin laajentaa monin eri tavoin. Tulosten kriittisen tarkastelun näkökulmasta kysyntäprosessien stokastisia ominaisuuksia voitaisiin tutkia laajemmin ja validoida tai hylätä mallinnuksessa tehty oletus Poisson-prosessin

noudattamisesta. Lisäksi mallin toimintaa voitaisiin tutkia tuotantoputkija-koja ja aikataulutuksen menetelmien yleisiä periaatteita muuttamalla. Mielenkiintoista olisi myös yrittää mallintaa nykyisiä suunnitteluperiaatteita, ja vertailla tuloksia tämän tutkimuksen tuloksiin. Toisaalta tuoteportfoliota ja tuotannonsuunnittelun tavoitteita voitaisiin analysoida tarkemmin syklisen aikataulutuksen kokeiden suunnittelun tukemiseksi. Koska tutkimuksessa todettiin tilauksesta valmistuksen ongelmallisuus koko tuoteportfolion osalta, voitaisiin mallia laajentaa myös tukemaan varastoon valmisamista ja optimaalisten varmuusvarastotasojen määrittelyä suhteessa eri toimitusvarmuusvaatimuksiin.

Viitteet

- [1] Abdulmalek, A., Rajgopal, J., 2007, *Analyzing the Benefits of Lean Manufacturing and Value Stream Mapping via Simulation: A Process Sector Case Study*, International Journal of Production Economics, Volume 107, pp.223-236
- [2] Chowdary, B.V., George, D., 2012, *Improvement of Manufacturing Operations at a Pharmaceutical Company: A Lean Manufacturing Approach*, Journal of Manufacturing Technology Management, Volume 23, Number 1, pp.56-75
- [3] Colasante, W., 2015, *2014 Product Launches: Price Premiums Versus Discounts and Time to Market*, IMS Consulting Group Pricing & Market Access Outlook , 2015/2016 Edition, https://www.imshealth.com/files/web/Global/Services/P&MA_2015.pdf
- [4] FDA, viitattu 1.11.2015, *Drugs@FDA Glossary of Terms*, <http://www.fda.gov/drugs/informationondrugs/ucm079436.htm#B>
- [5] Fimea, viitattu 1.11.2015, *Toimiluvat*, http://www.fimea.fi/valvonta/laaketehtaat_ja_-tukkukaupat/toimiluvat
- [6] Friedli, T., Basu, P., Bellm, D., Werani, J., 2013, *Leading Pharmaceutical Operational Excellence: Outstanding Practices and Cases*, Springer, Heidelberg, ISBN 978-3-642-35160
- [7] Friedli, T., Goetzfried, M., Basu, P., 2010, *Analysis of the Implementation of Total Productive Maintenance, Total Quality Management, and Just-In-Time in Pharmaceutical Manufacturing*, Journal of Pharmaceutical Innovation, Volume 5, Issue 4, pp.181-192
- [8] Heilala, J., Vatanen, S., Tonteri, H., Montonen, J., Lind, S., Johansson, B., Stahre, J., 2008, *Simulation Based Sustainable Manufacturing System Design*, Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, pp.1922-1930
- [9] Jahangirian, M., Eldabi, T., Naseer, A., Sterigioulas, L.K., Young, T., 2010, *Simulation in Manufacturing and Business: A Review*, European Journal of Operational Research, Volume 203, pp.1-13

- [10] Jung, J.Y., Blau, G., Pekny, J.F., Reklaitis, G.V., Eversdyk, D., 2004, *A Simulation Based Optimization Approach to Supply Chain Management under Demand Uncertainty*, Computers and Chemical Engineering, 28(2004), pp.2087-2106
- [11] Law, A.M., 2007, *Simulation Modeling and Analysis*, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, ISBN 978-007-125519-6
- [12] Musselman, K., O'Reilly, J., Duket, S., 2002, *The Role of Simulation in Advanced Planning and Scheduling*, Simulation Conference, 2002. Proceedings of the Winter, Volume 2, pp.1825-1830
- [13] Ogryczak, W., Ruszczyński, A., 1999, *From Stochastic Dominance to Mean-Risk Models: Semideviations as Risk Measures*, European Journal of Operational Research, 116(1999), pp.30-50
- [14] Packowski, J., 2013, *LEAN Supply Chain Planning: The New Supply Chain Management Paradigm for Process Industries to Master Today's VUCA World*, CRC Press, Boca Raton, ISBN 978-1-4822-0533-6
- [15] Papavasileiou, V., Koulouris, A., Siletti, C., Petrides, D., 2007, *Optimize Manufacturing of Pharmaceutical Products with Process Simulation and Production Scheduling Tools*, Chemical Engineering Research and Design, Volume 85, Issue 7, pp.1086-1097
- [16] Ramaekers, K., Janssens, G.K., 2008, *On the Choice of a Demand Distribution for Inventory Management Models*, European Journal of Industrial Engineering, 02/2008, 2(4), pp.479-491
- [17] Rohleder, T.R., Klassen, K., 2002, *Rolling Horizon Appointment Scheduling: A Simulation Study*, Health Care Management Science, 5, pp.201-209
- [18] Shah, N., 2004, *Pharmaceutical Supply Chains: Key Issues and Strategies for Optimisation*, Computers & Chemical Engineering, Volume 28, Issue 6-7, pp.929-941
- [19] Sridharan, V., Berry, W.L., 1990, *Freezing the Master Production Schedule Under Demand Uncertainty*, Decision Sciences, Volume 21, Issue 1, pp.97-120
- [20] WHO, 2014, *WHO Good Manufacturing Practices for Pharmaceutical Products: Main Principles*, Annex 2, WHO Technical Report Series 986

- [21] WHO, viitattu 1.11.2015, *GMP Questions and Answers*, http://www.who.int/medicines/areas/quality_safety/quality_assurance/gmp/en/