

Onni Rauhala

MONITASOINEN SIMULOINTI TUOTANTOJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELUSSA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tammikuu 2023

TIIVISTELMÄ

Onni Rauhala: Monitasoinen simulointi tuotantojärjestelmien suunnittelussa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Tammikuu 2023

Tässä työssä tutkitaan monitasoisen simuloinnin hyödyntämistä tuotantojärjestelmien suunnittelussa. Työssä esitellään monitasoisen järjestelmän ja simuloinnin käsite ja vertaillaan kattavasti eri tasojen simulointimenetelmiä ja niiden erityispiirteitä. Lisäksi tutkitaan, miten eri tasojen mallit on mahdollista integroida yhdeksi, monitasoiseksi simulointimalliksi. Lopuksi esitellään tuotantojärjestelmien suunnittelun periaatteita simuloinnin näkökulmasta sekä yleinen viitekehys simulointiprojektin suorittamiselle onnistuneesti.

Nykyaikaiset tuotantojärjestelmät ovat hyvin monimutkaisia ja yritykset investoivat yhä enemmän tuotannon jatkuvaan kehittämiseen ja edelleen tuottavuuden maksimointiin. Tehdassimulointi on tehokas työkalu tuotantojärjestelmien suunnittelussa ja sitä voidaan hyödyntää sekä uusien että jo olemassa olevien järjestelmien analysointiin. Simulointia voidaan hyödyntää hyvin laajasti erilaisten ongelmien analysoinnissa. Tuotantojärjestelmän suunnitteluvaiheessa sitä voidaan käyttää muun muassa layout-suunnitteluun ja teknologisten laitehankintojen varmentamiseen. Lisäksi järjestelmän toimintaa on mahdollista testata virtuaalisesti, jolloin voidaan ennakoita mahdolliset ongelmat tehtaan ylösajossa ja reagoida niihin ajoissa. Operatiivisessa toiminnassa simulointia voidaan käyttää esimerkiksi tuotannon aikataulutuksessa, jolloin on mahdollista ennustaa tilauksen toimitusaika ja vaadittavat resurssit.

LEAN-periaatteiden mukaan tuotantoa on jatkuvasti parannettava. Tuotantokustannusten noustessa ja asiakasvaatimusten tiukentuessa tuottavuus on saatava mahdollisimman korkealle. Arvoa tuottamaton työ on siis pyrittävä poistamaan. Tämä tarkoittaa esimerkiksi työstökoneiden asetusaikojen ja jonotusaikojen minimoimista. Simulointi auttaa ihmistä hahmottamaan järjestelmän ja löytämään ongelmakohdat ja ratkaisut niihin. Esimerkiksi materiaalivirtojen intensiteettiä simuloimalla voidaan helposti tunnistaa tuotannon pullonkaulat ja edelleen eliminoida ne.

Usein simuloidaan tuotantosolua tai kokonaista tuotantolinjaa. Prosessien yksityiskohtia ei yleensä oteta huomioon, vaikka prosessisimuloinnin menetelmät ovat hyvin tunnettuja. Enää ei kuitenkaan riitä, että keskitytään vain tiettyyn kokonaisuuteen irrallaan muusta järjestelmästä, vaan alijärjestelmien väliset riippuvuussuhteet on otettava huomioon simuloinnissa. Tähän tarpeeseen vastaa monitasoinen simulointi.

Monitasoisen simuloinnin tavoitteena on integroida alijärjestelmien simulointimallit yhdeksi kokonaisvaltaiseksi malliksi. Huomattavimpia etuja verrattuna yksitasoiseen malliin ovat mahdollisuus simuloida jokaista alijärjestelmää sille sopivimmassa ympäristössä, olemassa olevien mallien hyödyntäminen ja simulointiajan lyheneminen. Monitasoinen simulointi tarjoaa parhaimmillaan täsmällisiä tuloksia tuotannon kaikilla tasoilla. Näin ollen merkittävä etu on myös monitasoisen mallin skaalautuvuus, sillä sen avulla voidaan analysoida tuotantojärjestelmää niin aikataulutuksen kuin fysikaalisen työstöprosessin kannalta.

Avainsanat: simulointi, tuotantojärjestelmät, tehdassimulointi, monitasoinen simulointi, tapahtumapohjainen simulointi, tuotantojärjestelmien suunnittelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. MONITASOINEN TEHDASSIMULOINTI.....	3
2.1 Määritelmä ja käsitteet	3
2.2 Simuloinnin tavoite.....	5
2.3 Monitasoinen järjestelmä ja simulointi	5
2.3.1 Fysikaalinen prosessi ja työstökone.....	8
2.3.2 Tuotantosolu.....	10
2.3.3 Tuotantoprosessi	12
2.3.4 Tuotannonohjaus ja -suunnittelu	14
3. SIMULOINTITASOJEN MALLIEN YHDISTÄMINEN	16
3.1 Toteutus.....	16
3.2 Integroitu työstökoneen ja -prosessin simulointi	18
3.3 Tehdassimuloinnin haasteet ja rajoitteet	19
4. SIMULOINTI TUOTANTOJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELUN TUKENA	21
4.1 Tuotantojärjestelmien suunnittelu.....	21
4.2 Simulointiprojekti.....	22
5. TULOSTEN ANALYSOINTI	27
6. YHTEENVETO.....	29
LÄHTEET	31

LYHENTEET JA MERKINNÄT

API	engl. Application Programming Interface, ohjelmointirajapinta
CAD	engl. Computer Aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CAM	engl. Computer Aided Manufacturing, tietokoneavusteinen valmistus
CAPE	engl. Computer Aided Production Engineering, tietokoneavusteinen tuotantotekniikka
CNC	engl. Computer Numerical Control, tietokoneistettu numeerinen ohjaus
FIFO	engl. First In, First Out, ensimmäisenä sisään, ensimmäisenä ulos
FEM	engl. Finite Element Method, elementtimenetelmä
FMS	engl. Flexible Manufacturing System, joustava tuotantojärjestelmä
LIFO	engl. Last In, First Out, viimeisenä sisään, ensimmäisenä ulos
NC	engl. Numerical Control, numeerinen ohjaus
RMS	engl. Reconfigurable Manufacturing System, uudelleenkonfiguroitava tuotantojärjestelmä
SPT	engl. Shortest Process Time, lyhyin prosessointiaika
UML	engl. Unified Modelling Language, graafinen mallinnuskieli

1. JOHDANTO

Tuotantojärjestelmät ovat nykyään hyvin monimutkaisia ja ne kehittyvät jatkuvasti uudenlaisia asiakastarpeita varten. Järjestelmien kehittyessä ei enää riitä, että keskitytään yksittäiseen osakokonaisuuteen, vaan on tarpeen tutkia osakokonaisuuden toimintaa osana laajempaa järjestelmää (Cantot & Luzeaux 2011). Tähän tehtävään simulointi on tehokas työkalu.

Simuloinnilla on nykyään tärkeä merkitys tuotantojärjestelmien analyysissa ja sitä voidaan hyödyntää niiden suunnittelussa, ylösajossa sekä operatiivisessa toiminnassa. Suunnitteluvaiheessa eri järjestelmävaihtoehtoja voidaan visualisoida ja määrittää muun muassa läpimenoajat ja käyttöasteet, mikä helpottaa teknologisten päätösten tekemistä. Tuotantojärjestelmän tehokkuutta voidaan simuloimalla testata jo ennen reaalijärjestelmän ylösajoa. Näin ollen on mahdollista havaita ylösajossa esiintyvät ongelmat ja reagoida niihin ajoissa. Operatiivisessa toiminnassa simulointia sovelletaan esimerkiksi uusien tuotantotapojen testaamiseen sekä aikataulutukseen. Tällöin tietyille tilaukselle voidaan ennustaa sen vaatimat resurssit ja todennäköinen toimitusaika. (Bangsow 2010)

Tässä työssä tutkitaan monitasoisen simuloinnin soveltamista tuotantojärjestelmien suunnitteluvaiheessa. Työ rajataan kappaletavaratuotantoon ja keskittyy koneiden ja järjestelmien simulointiin eli ihmisten vaikutus jätetään huomioimatta. Työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena, jossa käytetään lähteinä pääosin 2000-luvun vertaisarvioituja artikkeleita ja konferenssijulkaisuja.

Kirjallisuuskatsaus on tutkimusmetodi, jossa tutkitaan jo tehtyä tutkimusta. Kirjallisuuskatsaus voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: kuvailevaan, systemaattiseen ja meta-analyysiin. (Salminen 2011) Tässä työssä tutkimusmenetelmänä sovelletaan kuvailevaa kirjallisuuskatsausta, joka on edellä mainituista tyypeistä yleisin. Salmisen mukaan se on luonteeltaan yleiskatsaus eikä käytettävien lähteiden valintaa ole rajoitettu.

Työssä esitellään monitasoisen järjestelmän ja simuloinnin käsite. Tavoitteena on kattavasti vertailla eri tasojen simulointia: Mitä simulointimenetelmiä voidaan soveltaa ja mitä erityispiirteitä tietyllä tasolla on? Lisäksi tutkitaan mahdollisuutta yhdistää eri tasojen mallit yhdeksi monitasoiseksi malliksi.

Tutkimuskysymykset ovat siis:

K1. Mitä on monitasoinen tehdassimulointi ja miten eri tasoja voidaan simuloida?

K2. Mitä hyötyjä monitasoisella mallilla on verrattuna yksitasoiseen simulointiin?

K3. Miten simulointia voidaan hyödyntää tuotantojärjestelmien suunnittelussa?

Luvussa 2 käsitellään tehdassimulointia ja esitellään simuloinnin monitasoinen näkökulma helpottamaan laajojen kokonaisuuksien käsittelemistä valmistavan teollisuuden tuotantojärjestelmissä. Luvussa esitellään tyypillisiä tapoja jakaa simulointitasot hierarkkisesti ja käsitellään niiden simulointimenetelmiä tarkemmin. Jokaisen tason simuloinnista esitetään kattavasti yksi esimerkkitapaus. Luvussa 3 tutkitaan simulointitasojen yhdistämisen mahdollisuutta tavoitteena luoda koko järjestelmän kattava simulointimalli, jossa tuotannon yksityiskohdat on otettu huomioon. Luvussa käsitellään yhdistämisen haasteita ja käytännön toteutusta. Lopuksi pohditaan yleisesti tehdassimuloinnin haasteita sekä monitasoisen mallin rajoitteita ja hyötyjä verrattuna yksinkertaiseen malliin. Luvussa 4 tutkitaan, kuinka monitasoista simulointia voidaan hyödyntää tuotantojärjestelmien suunnitteluvaiheessa mahdollisimman tehokkaasti. Luvussa esitellään tuotantojärjestelmien suunnittelun periaatteita ja esitellään viitekehys simulointiprojektin suorittamiselle. Luvussa 5 analysoidaan tutkimuksesta saadut tulokset ja pohditaan tutkimuksen rajoitteita. Luku 6 on yhteenveto ja päättää työn.

2. MONITASOINEN TEHDASSIMULOINTI

2.1 Määritelmä ja käsitteet

Tehdassimulointi tarkoittaa teollisuuden reaali-prosessin tai järjestelmän toiminnan jäljittelemistä. Simulointi on parhaimmillaan tehokas työkalu järjestelmän analysointiin ja ongelmanratkaisuun koskien sekä olemassa olevaa että täysin uutta tuotantojärjestelmää. (Banks 1998) Simulointia sovelletaankin paljon dynaamisten järjestelmien analysointiin (Herrmann et al. 2016).

Simulointimalli on tietokoneavusteisesti luotu jäljitelmä simuloinnin kohteesta. Mallin on oltava riittävän tarkka täyttääkseen simuloinnin tavoitteet, mutta ei turhan kompleksinen. (Banks 1998) Simuloinnin tavoitteita käsitellään tarkemmin luvussa 2.2. Tapahtuma on tekijä, joka muuttaa mallin tilaa. Tapahtumat voidaan jakaa kahteen luokkaan: sisäisiin (endogeenisiin) ja ulkoisiin (eksogeenisiin) tapahtumiin. Sisäiset tapahtumat ovat simuloitavan järjestelmän sisällä tapahtuvia prosesseja. (Banks 1998) Esimerkiksi tuotantosolussa tapahtuva työstöprosessin alkaminen ja lopettaminen ovat sisäisiä tapahtumia. Ulkoiset tapahtumat ovat niin ikään ulkoisia tekijöitä, jotka vaikuttavat mallin toimintaan (Banks 1998). Ulkoinen tapahtuma on esimerkiksi asiakkaan tekemä tilaus tehtaalle.

Simulointimallit voidaan jakaa staattisiin ja dynaamisiin eli ajasta riippuviin. Staattisissa malleissa tarkastellaan tiettyä muuttumatonta ajanhetkeä. Dynaamiset mallit jaetaan edelleen diskreetteihin sekä jatkuvatoimisiin malleihin. Diskreetissä simuloinnissa mallin tila muuttuu diskreetteinä ajan hetkinä, kun taas jatkuvatoimisen mallin tila muuttuu jatkuvasti. Lisäksi diskreetit simulointimallit voidaan jakaa tapahtuma- ja aikapohjaisiin. Tapahtumapohjaisessa simuloinnissa mallin tila muuttuu vain jonkin tapahtuman seurauksena, mitkä eivät välttämättä tapahdu tasaisin väliajoin. (Bernidaki et al. 2014) Tapahtumapohjainen simulointi soveltuu hyvin kompleksisten prosessien kuvaamiseen ja sitä käytetäänkin yleensä mallintamaan ympäristöjä, joissa jokin objekti liikkuu prosessin läpi tietyssä järjestyksessä (Abdelatif et al. 2021).

Aikapohjaisessa simuloinnissa mallin tila muuttuu tasaisin väliajoin (Bernidaki et al. 2014). Jatkuvatoimista mallia kuvaa hyvin esimerkiksi vesisäiliön täyttäminen vesiletkulla, jolloin säiliön vedenpinnan korkeus muuttuu jatkuvasti. Vastaavasti tapahtumapohjaista simulointia voidaan kuvata vesisäiliön täyttämistä ämpärin avulla, jolloin mallin tila muuttuu aina, kun säiliöön kaadetaan lisää vettä.

Yleensä esimerkiksi matemaattiset ja niin kutsutut sisääntulo-ulostulo-mallit esittävät järjestelmän sisään- ja ulostulot eksplisiittisesti, mutta järjestelmän toiminta perustuu matemaattiseen tai tilastolliseen teoriaan. Aikaisemmin mainituissa tapahtumapohjaisissa ja jatkuvatoimisissa simulointimalleissa on lisäksi yksityiskohtaisesti mallinnettu myös järjestelmän toiminta riittävällä tarkkuudella. (Banks 1998)

Simulointimallit voidaan jakaa deterministisiin ja stokastisiin. Deterministinen malli tuottaa aina saman tuloksen samoilla simulointiparametrien arvoilla. (Bernidaki et al. 2014) Matematiikassa funktiot ovat siis yksi esimerkki deterministisestä mallista. Stokastinen malli ei sen sijaan aina tuota samaa lopputulosta, vaan se vaihtelee riippuen käytetystä jakaumasta (Bernidaki et al. 2014). Simuloinnissa voidaan hyödyntää myös satunnaislukuparametreja luomaan alkuarvoja stokastiselle mallille (Dantan et al. 2020).

Tilamuuttujat (eng. system state variables) määrittelevät järjestelmän tilan tietyllä ajan hetkellä. Tilamuuttujat määritellään aina tapauskohtaisesti. Tapahtumapohjaisessa mallissa tilamuuttujat pysyvät vakiona ajan suhteen ja muuttuvat ainoastaan määriteltynä ajanhetkinä. Näitä ajanhetkiä kutsutaan tapahtuma-ajoina. Jatkuvatoimisissa malleissa tilamuuttujat ovat sen sijaan määritelty differentiaaliyhtälöiden avulla. Tällöin tilamuuttujat muuttuvat jatkuvasti ajan suhteen. (Banks 1998)

Objekti (eng. entity) on eksplisiittisesti määritelty kokonaisuus simulointimallissa. Objekti voi olla dynaaminen, jolloin se liikkuu järjestelmässä tai staattinen, jolloin se palvelee muita järjestelmän objekteja. (Banks 1998) Kappaletavarateollisuudessa dynaaminen objekti on esimerkiksi kuljettimen materiaalipaletti, joka tuo varastosta automaattisesti tarvittavat materiaalit työstettäväksi. Staattinen objekti voisi kappaletavarateollisuudessa olla esimerkiksi työstökone. Jokaisella objektilla on tietyt, ainoastaan kyseistä objektia koskevat attribuutit, jotka sisältävät informaatiota kokonaisuudesta (Banks 1998). Esimerkiksi kuljettimen materiaalipaletin yksi attribuuteista voisi olla lähtö- tai saapumisaika. Työstökoneen attribuutteja voisivat olla muun muassa työstöaika tai valittu työkalu.

Resurssit ovat objekteja, jotka toteuttavat jonkin palvelun samanaikaisesti yhdelle tai useammalle dynaamiselle objektille. Resurssilla on vähintään kaksi tilaa: vapaa ja varattu. Lisäksi vaihtoehtoisia tiloja ovat muun muassa viallinen tai estetty. Dynaaminen objekti voi tarvittaessa pyytää yhden tai useamman yksikön resursseja. Mikäli resursseja ei ole pyyntöhetkellä saatavilla, pyytävä objekti siirtyy jonotilaan tai vaihtoehtoiseen tehtävään. (Banks 1998)

Objektit allokoidaan resursseille joko lisäämällä ne välittömästi listaan (jonoon) tai sitomalla ne johonkin tiettyyn tapahtumaan, jolloin kyseisen tapahtuman tapahtuma-aikana

lähetetään pyyntö resurssille. Edellä mainittuja listoja käsitellään useimmiten FIFO-periaatteella (eng. First In, First Out), jossa ensimmäisenä pyytäneelle objektille lähetetään pyydyt resurssit ensimmäisenä. Lisäksi myös LIFO- (eng. Last In, First Out) ja SPT- (eng. Shortest Process Time) periaatteet ovat mahdollisia. SPT-periaatteen mukaan resurssi lähetetään ensimmäisenä objektille, jonka prosessointiaika (tallennettu attribuuttiin) on lyhyin. (Banks 1998)

Toiminto on ajanjakso, jonka kesto on tiedossa jo ennen toiminnon aloittamista. Toiminnon kesto voi olla vakio tai satunnaisesti jakautunut. Viive on äärellinen aika, joka voi olla seurausta useista järjestelmän tilatekijöistä. Esimerkiksi, kun objekti asetetaan johon resurssia varten, syntyy viivettä, jonka kesto ei välttämättä voida tietää etukäteen. (Banks 1998)

2.2 Simuloinnin tavoite

Simuloinnilla on lukuisia käyttökohteita ja hyötyjä teollisuudessa ja virtuaalinen valmistaminen on todettu toimivaksi työkaluksi sekä uusien että olemassa olevien järjestelmien analyysissa. Ennen varsinaisen järjestelmän käyttöönottoa on ensiarvoisen tärkeää, että suunnitelma vastaa käyttövaatimuksia parhaalla mahdollisella tavalla. Ottaen huomioon järjestelmän kompleksisuuden, suunnittelijat tarvitsevat CAPE (eng. Computer Aided Production Engineering) -työkaluja avukseen, jotta voidaan tehokkaasti analysoida järjestelmää yksityiskohtaisesti. (Dengzhe et al. 2006) CAPE-työkaluilla tarkoitetaan tietokoneavusteisia suunnitteluohjelmistoja.

Simulointi auttaa ihmistä hahmottamaan kompleksisia järjestelmiä ja voi olla hyvä apuväline palaverissa esimerkiksi asiakkaan kanssa. Tällöin suunniteltu järjestelmä on huomattavasti helpompi esittää asiakkaalle, koska sen voi konkreettisesti näyttää. Lisäksi simulointia voidaan hyödyntää uuden tuotantojärjestelmän operaattoreiden koulutuksessa. (Cantot & Luzeaux 2011) Tällöin esimerkiksi työntekijän on helpompi ymmärtää, miten hänen työtehtävänsä vaikuttavat koko järjestelmän toimintaan (Carson 2009).

Järjestelmän ominaisuuksia voidaan helposti testata simuloimalla. Suunnitteluvaiheessa simulointia voidaan käyttää muun muassa teknologisten päätösten varmentamiseen (Cantot & Luzeaux 2011). Simulointi on siis korvike reaalijärjestelmällä testaamiseen, joka on yleensä haitallista tuotannolle, kallista tai jopa mahdotonta (Law 2019).

2.3 Monitasoinen järjestelmä ja simulointi

Järjestelmän kompleksisuus voidaan määritellä kahden tekijän, komponenttien lukumäärän ja niiden välisten riippuvuussuhteiden lukumäärän mukaan. Ei siis riitä, että otetaan

huomioon vain järjestelmän yksittäiset komponentit. Kompleksisuutta lisäävät myös monet muut tekijät, muun muassa ohjelmistojen merkittävä osuus järjestelmästä tai ihmisen toiminta. (Cantot & Luzeaux 2011)

Monitasoinen järjestelmä (eng. a system of systems) on useiden alijärjestelmien muodostama hierarkkinen kokonaisuus, jossa jokaisella alijärjestelmällä on oma tehtävänsä ja ne kaikki toimivat synkronoidusti saavuttaakseen tässä tapauksessa tuotannon tavoitteet. On kuitenkin huomattava, että kyseessä ei välttämättä ole vain ja ainoastaan alijärjestelmien summa. (Cantot & Luzeaux 2011)

Tehdas- ja logistiikkasuunnittelussa keskitytään yleensä useiden eri prosessien materiaalikuljetusjärjestelmiin ja niiden säätöjärjestelmien vuorovaikutuksiin. Näiden simulointi toteutetaan yleensä tapahtuma- tai agenttipohjaisina ja prosessien yksityiskohtia ei voida lainkaan muokata simulointimallissa. Toisaalta prosessisimuloinnissa tuotantoprosessit mallinnetaan yksityiskohtaisempaa simulointia ja analysointia varten. (Delbrügger et al. 2018) Edellä mainitut ovat esimerkkejä tuotannon eri tasoista, joilla on kaikilla omat erityispiirteensä vaikuttaen merkittävästi niiden simulointiin.

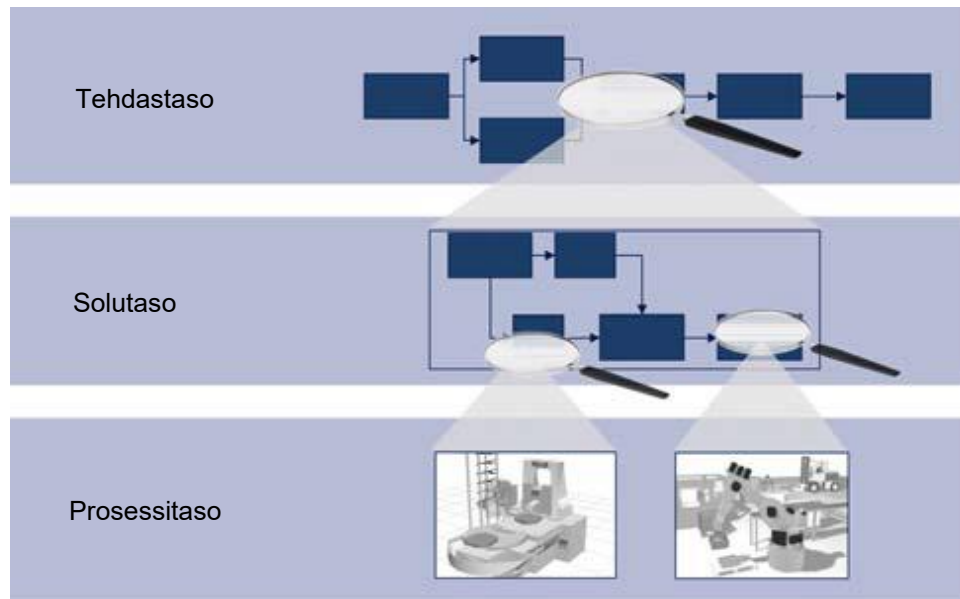
Usein simuloidaan vain yhtä tasoa ja käsitellään sitä erillään muista järjestelmän tasoista. Tämänkaltainen yksitasoinen simulointi jättää kuitenkin huomioimatta eri tasojen väliset vuorovaikutukset sekä riippuvuussuhteet. Tällöin simuloinnin tulokset eivät täsmällisesti vastaa kokonaista reaaliympäristöä. (Herrmann et al. 2016) Monitasoisella simuloinnilla (eng. multi-level simulation) tarkoitetaan monitasoisen järjestelmän kattavaa simulointia jokaisella tasolla. Sen tavoitteena on integroitu analyysi useiden järjestelmien tai alijärjestelmien toiminnasta sekä niiden vaikutuksista toisiinsa. (Herrmann et al. 2016) Näin ollen on mahdollista saavuttaa kokonaisvaltainen simulointimalli, joka tuottaa yksityiskohtaisia ja todenmukaisia tuloksia koko järjestelmästä.

Monitasoisessa simulointimallissa jokainen yksittäinen simulointimalli esittää siis alijärjestelmää laajemmassa kokonaisuudessa, mitkä pyritään liittämään yhteen. Huomattavimpia etuja ovat muun muassa:

- Jokaista alijärjestelmää voidaan simuloida ympäristössä, joka on kyseiselle järjestelmälle sopivin.
- Jo olemassa olevia simulointimalleja voidaan hyödyntää.
- Simulointiaika lyhentyy. (Thiede et al. 2016)

Lisäksi skaalattavuus on merkittävä etu, joka on saavutettavissa vain monitasoisen simuloinnin avulla. Skaalattava malli mahdollistaa yksityiskohtaisen analysoinnin hyvin

laajassakin mallissa. Niin kutsuttu suurennuslasiperiaate on esitetty kuvassa 1. Periaatteen mukaan suurennuslasi voidaan siirtää olennaisten kohteiden päälle tarkempaa analysointia varten. (Reinhart & Wünsch 2007)



Kuva 1. Monitasoisen simulointimallin skaalattavuus. (Muokattu lähteestä Reinhart & Wünsch 2007)

Simuloinnin tasot valmistavassa teollisuudessa voidaan jakaa usealla erilaisella tavalla riippuen simuloinnin kohteesta ja tavoitteista. Reinhart ja Wünsch (2007) jakavat simulointitasot autoteollisuuden sovelluskohteessa neljään eri tasoon seuraavasti:

1. prosessitaso,
2. konetaso,
3. solutaso,
4. tehdastaso.

Andersson ja Nylund (2010) esittävät samankaltaisen jaon, jossa vastaavat tasot ovat mikro- mesa- ja makrotasot. Mikrotasolla käsitellään työstökoneita, valmistusmenetelmiä ja valmistettavia kappaleita. Mallintamiseen käytetään esimerkiksi CAD/CAM-työkaluja. Makrotasoon sisältyy tehtaan kaikki työvaiheet sekä materiaalivirrat ja informaation kulku niiden välillä. Simulointia käytetään muun muassa layout-suunnitteluun sekä järjestelmän tehokkuuden mittaamiseen. Mikro- ja makrotasojen väliin jää kuitenkin väli, sillä makrotason ilmiöitä ei voida selittää mikrotason toimintojen perusteella. Mesa-taso asetuu edellä mainittujen tasojen väliin yhdistääkseen ne. Tälle tasolle sisältyy erilliset valmistusyksiköt, fyysisistä tai loogisista valmistusyksiköistä koostuvat alueet ja niiden väliset vuorovaikutukset. Mesa-tason suunnitteluun kuuluu esimerkiksi tuotantosolun layout-

suunnittelu, materiaalinkäsittely ja myös ihmisten vaikutus. Huomattavaa on, että alemmat tasot sisältyvät korkeampiin tasoihin. Esimerkiksi Mesa-taso on siis osa makrotasoa. (Andersson & Nylund 2010)

Vasteaika ja informaation määrä kasvavat mitä korkeammalle tasolle siirrytään (Reinhart & Wunsch 2007). Matalin taso on nyt prosessitaso ja korkein on tehdastaso. Prosessitasolla järjestelmän vasteaika on korkeintaan millisekuntien suuruusluokassa, kun taas tehdastasolla se voi olla jopa viikkoja. Vastaavasti prosessitasolla kulkeva informaatio voidaan laskea biteissä ja tehdastasolla käsitellään valtavan kokoisia tiedostoja. (Reinhart & Wunsch 2007)

Toisaalta Delbrügger et al. (2018) esittävät myös henkilöstön toiminnan sisällyttämisen monitasoiseen simulointimalliin. Tässä työssä ihmisen vaikutus jätetään kuitenkin huomioimatta, sillä ihmisten simulointi eroaa merkittävästi koneiden simuloinnista. Jaetaan simuloinnin tasot nyt mukailien edellä mainittua Reinhartin ja Wünschin (2007) mallia. Tutkittavat tasot tässä työssä ovat:

- fysikaalinen prosessi ja työstökone,
- tuotantosolu,
- tuotantoprosessi ja
- tuotannonohjaus ja -suunnittelu.

2.3.1 Fysikaalinen prosessi ja työstökone

Valmistusprosessi määritellään yhden tai useamman fysikaalisen mekanismin hyödyntämistä materiaalin muodon ja/tai ominaisuuksien muuttamiseksi (Bernidaki et al. 2014). Nykyisen valmistustekniikan tavoitteena on valmistaa tuotteet oikein, nopeasti sekä kustannustehokkaasti jo ensimmäisestä kappaleesta alkaen. Valmistettavien tuotteiden kompleksisuus kasvaa jatkuvasti ja samaan aikaan aika, jonka se kestää markkinoilla kilpailukykyisenä, vähenee. Näiden seurauksena fyysisten prototyyppien koekäytöt ovat muodostuneet työstökoneiden valmistamisen pullonkaulaksi. (Altintas et al. 2005) Altintas et al. (2005) tutkivat työstökoneiden simulointia niiden valmistuksen kannalta, mutta painottavat, että simulointimallit ovat erittäin hyödyllisiä myös tuotannon aloittamisen aikana sekä työstöoperaatioiden simuloinnissa.

NC (Numerical Control) -työstöratojen ja työstön simuloinnissa otetaan yleensä huomioon vain työkalun jäykän rungon kinematiikka eikä huomioida fysikaalista työstöprosessia. Leikkausvoimien suuruus, vääntömomentti, teho ja työstöprosessin aikana syntyvä

lämpö riippuvat työkalun geometriasta, työstettävän kappaleen ja työkalun välisestä dynamiikasta, materiaalin ominaisuuksista sekä työstöparametreista, kuten esimerkiksi syötöstä, nopeudesta ja leikkaussyvyydestä. Yleensä työstöparametrit valitaan valmistajan ohjeistuksen tai operaattorin kokemuksen perusteella, mikä ei välttämättä johda tehokkaaseen ja täsmälliseen tuotantoon. (Altintas et al. 2005)

Nykyaikaisen, mekatronisen työstökoneen suorituskyvyn ja tehokkuuden määrittelevät pääosin sen kinematiikka, rakenteellinen dynamiikka, tietokoneistettu numeerinen ohjausjärjestelmä sekä työstöprosessi (Altintas et al. 2005). Altintas et al. (2005) esittävät kolme eri menetelmää työstökoneiden simulointia varten:

- 3D-CAD-mallinnus,
- elementtimenetelmä ja
- kytketty monitasoinen simulointi.

CNC (Computer Numerical Control) -työstökeskus koostuu tietokoneesta, tehoelektronikkakomponenteista, kuten esimerkiksi moottorivahvistimista ja elektroniikkapiireistä, sekä servotoimilaitteista. Työstökeskuksen tietokoneelle viedään NC-ohjelma, joka sisältää työstöradat, tarvittavan työkalun, syötön ja karan nopeuden. (Altintas et al. 2005)

CNC-koneen simulointi sisältää virtuaalisen mallintamisen työstökoneen kinematiikasta ja syötön dynamiikasta, työstettävän kappaleen geometrian muutosten päivittämisen sekä käyttö- ja apulaitteiden liikkeet, mitkä aiheutuvat muun muassa työkalun ja kiinnitysalustan vaihdoista. Nykyaikaiset CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) -ohjelmat kykenevät CAD-ympäristössä visuaalisesti esittämään työstettävän kappaleen geometrian muutokset, työkalun mallin ja sen kinematiikan sekä kiinnitykset. Ohjelmat kykenevät myös varoittamaan mahdollisista virheistä työstöradalla, mitkä voisivat reaalitylanteessa aiheuttaa törmäyksen. (Altintas et al. 2005)

Lisäksi osassa nykyaikaisista CNC-koneista on työstön simulointi integroituna. Työstön aikana simulointiohjelmaa ajetaan reaali-prosessin edellä. Mikäli simuloinnin aikana on riski törmäykselle, työstökone pysähtyy välittömästi. Edellä mainitut menetelmät eivät kuitenkaan riitä realistiseen CNC-koneen simulointiin. Työstöpään liikkeen ja työstettävän kappaleen geometrian muutosten simulointi vaatii reaaliaikaisen työstöradan generoimisen, toimilaitteiden dynamiikan ja työstöprosessia mahdollisesti häiritsevien tekijöiden huomioimisen. (Altintas et al. 2005)

Altintas et al. (2005) esittävät simulointimenetelmän metallin työstämiseksi. Leikkausvoimien amplitudia ja taajuutta, väntömomenttia sekä tehoa käytetään työstökoneen ra-

kenteiden, karan, syöttökoneiston, laakereiden, moottorien ja voimansiirron mitoitukseseen. Lisäksi nämä vaikuttavat myös työkalun varren sekä kiinnityksen mitoitukseseen. Työkalun sekä työstettävän kappaleen rasituksia ja lämpötilamuutosten vaikutuksia hyödynnetään syötön, nopeuden ja leikkaussyvyyden optimoinnissa, jotta välttyttäisiin jännönsjännitysten syntymiseltä. (Altintas et al. 2005)

Elementtimenetelmää (eng. Finite Element Method, FEM) käytetään laajasti työstökoneiden työkalujen suunnittelussa (Altintas et al. 2005). Elementtimenetelmä on yleinen työkalu lujuuslaskennassa etenkin silloin, kun ongelmaa ei voida ratkaista analyttisesti tai se on muuten epäkäytännöllistä. Elementtimenetelmä perustuu ratkaisualueen diskretoimiseen pieniin, määrätyn muotoisiin alueisiin, joita kutsutaan elementeiksi. Tällöin alkuperäinen ongelma yksinkertaistuu ja voidaan määrittää ratkaisun approksimaatio. Mitä tiheämpää elementtiverkkoa käytetään, sitä tarkempi approksimaatio saadaan. (Rao 2018)

Elementtimenetelmän avulla voidaan hyvin optimoida terän geometriaa ja valmistusmateriaalia, jotta se kestävä korkeat rasitukset sekä lämpötilan muutokset työstön aikana. Onnistunut 3D FEM-simulointi on riippuvainen oikeista reunaehdoista sekä materiaalin käyttäytymisen tuntemuksesta. On huomattava, että tässä tapauksessa materiaalimalli eroaa yksinkertaisten vetokokeiden tuloksista johtuen työstön aiheuttamista suurista rasituksista, rasitustaajuuksista sekä lämpötilamuutoksista. Tarkkojen ja käyttökelpoisten tulosten (lastuaminen, rasitukset ja lämpötilan jakautuminen) saavuttamiseksi on välttämätöntä, että työstettävän materiaalin muodonmuutoslujuus sekä kitkavoima terän ja työstettävän pinnan välillä ovat määritetty täsmällisesti. (Altintas et al. 2005)

Wegener et al. (2022) esittävät simulointimenetelmän kulmavaihteen työstämiseen. Simuloinnissa määritettiin työstövoimat sekä työkalun taipuminen ja kuluminen. Simulointia hyödyntämällä voitiin tehokkaasti arvioida työstövoimia, lastujen paksuutta sekä työkalun kulumaa. Tällöin on mahdollista optimoida työstökoneen parametrejä, kuten esimerkiksi syöttöä, mikä kokeellisin menetelmin olisi merkittävästi hankalampaa. Simuloinnin avulla saatiin tarkempaa tietoa prosessin parametreistä, jolloin työstökoneen asetukset on helpompi säätää niin, että minimoidaan työstöaika sekä työkalun kuluminen. (Wegener et al. 2022)

2.3.2 Tuotantosolu

Tuotantoprosessin jakaminen tuotantosoluihin on seurausta muun muassa LEAN-ajattelusta. Tuotantosolun etuja ovat lyhyet materiaalivirrat ja mahdollisuus joustavaan työhön. (Berlec et al. 2017)

Berlec et al. (2017) hyödynsivät tapahtumapohjaista simulointia jo olemassa olevan tuotantosolun layoutin optimointiin, mikä mahdollistaa erilaisten "Mitä jos?" -skenaarioiden kokeilemisen ja algoritmien soveltamisen. Layoutilla tarkoitetaan tuotantolaitoksen pohja-asettelua eli tehtaan eri toimintojen (muun muassa koneet, kuljettimet ja varastot) järjestystä. Onnistunut layout mahdollistaa tehokkaat materiaalivirrat, tehokkaan tilan käytön sekä on tärkeä tekijä läpäisyajan minimoimisessa.

Simuloinnin tavoitteena on suunnitella paras mahdollinen layout esimerkiksi työstökoneille tai automatisoiduille roboteille solun sisällä. Optimaalinen layout perustuu materiaalivirtaan, jonka reitin halutaan luonnollisesti olevan mahdollisimman lyhyt valitulla ajanjaksolla. (Berlec et al. 2017)

Berlec et al. (2017) käyttivät tuotantosolun mallintamiseen ja simulointiin Siemens Plant Simulation -ohjelmistoa, joka perustuu tapahtumapohjaiseen teoriaan ja olio-ohjelmointiin. Malli toteutettiin niin, että simuloinnissa voitiin hyödyntää todellista lähtödataa tuotannosta. Simulointimalli esittää solun alkuperäisen tilan ja sisältää kaikki sen ominaisuudet tietyllä ajanhetkellä. Jokainen työpiste esittää yhtä konetta sisältäen puskurin ja paikan, jossa tehtävä suoritetaan. Simuloinnin ulostulona saadaan:

- koneiden välisten materiaalivirtojen intensiteetti,
- kuljetuskustannukset ja
- Sankey-kaavio. (Berlec et al. 2017)

Sankey-kaaviolla kuvataan prosessin materiaalivirtoja. Kaavio muodostuu virtoja kuvaavista nuolista, joiden suunta määrää virran suunnan ja koko virran suuruuden. Simuloinnin tulokset vietiin lopuksi VisTABLE-ohjelmistoon visualisointia varten (Berlec et al. 2017).

Simulointimallissa yksinkertaiset riippuvuussuhteet tuotantosolun prosessien välillä ovat mallinnettu simulointiohjelman vakio-objekteilla. Monimutkaisempiin loogisiin riippuvuuksiin hyödynnetään sen sijaan metodeja tai valmiita kirjastoja SimTalk-ohjelmointikielen avulla. (Berlec et al. 2017)

Aluksi simulointi määrittää materiaalivirrat koneiden alkuperäiselle järjestykselle tuotantosolussa. Tämän jälkeen se alkaa etsiä parempaa järjestystä algoritmin avulla. Algoritmi muuttaa koneiden järjestystä, jolloin voidaan määrittää uutta järjestystä vastaavat materiaalivirrat sekä kuljetuskustannukset. Tätä prosessia suoritetaan niin kauan, kunnes algoritmi ei enää löydä parempaa ratkaisua ja on näin ollen löytänyt optimaalisen layoutin. (Berlec et al. 2017)

Simulointimallissa koneet olivat sijoitettu tasaisesti ympyränkaarelle ja vain niiden järjestyksestä muutettiin. Todellisuudessa tuotantosolua ei kuitenkaan voida rakentaa ympyrän muotoiseksi, vaan usein käytetään U-muotoa. Tällöin kustannukset kasvoivat hieman, mutta simuloinnin avulla saatiin kuitenkin parannettua solun layoutia. (Berlec et al. 2017)

2.3.3 Tuotantoprosessi

Tuotannon materiaalivirta tarkoittaa materiaalien liikettä prosessin tai arvoketjun läpi tarkoituksena tuottaa raakamateriaalista lopputuote. Nykyään asiakkaat vaativat yhä enemmän kustomoituja tuotteita, joten on tärkeää, että yritykset kykenevät vastaamaan kysyntään tehokkaasti. (Bernidaki et al. 2014) Yritysten on siis jatkuvasti kehitettävä pysyäkseen kilpailukykyisinä (Banks 1998).

Banksin (1998) mukaan yritykset hakevat vastauksia seuraavanlaisiin kysymyksiin:

- Milloin seuraava laite tulisi hankkia?
- Kuinka monta työntekijää vaaditaan ensi kuussa, jotta tilaukset saadaan toimitettua?
- Voidaanko uusi tilaus hyväksyä ilman, että muut työt viivästyvät?
- Miten uusi tuotantolaitos toimii viiden vuoden kuluttua?
- Miten keskeneräistä tuotantoa ja läpimenoaikaa voidaan lyhentää ja samalla lisätä tuotantomäärää?

Tuotantojärjestelmien simulointiin sovelletaan useimmiten tapahtumapohjaista simulointia. Se on joustava työkalu, joka mahdollistaa erilaisten vaihtoehtojen ja operointistrategioiden vertailemisen. (Negahban & Smith 2014) Barabas ja Florescu (2020) käyttivät Tecnomatix Plant Simulation -ohjelmistoa joustavan valmistusjärjestelmän (FMS) analysointiin tunnistakseen tuotannon häiriöt ja edelleen optimoidakseen prosessin. Joustavan valmistusjärjestelmän periaatteiden mukaan tuotantoa mukautetaan muuttuviin markkinoihin. Tällöin tuotantojärjestelmä mahdollistaa tuotteiden mukauttamisen ja pienten erien valmistamisen, nopean reagoinnin markkinatilanteeseen sekä tuotantojärjestelmän muokkaamisen esimerkiksi tuotantomäärien muuttamista varten. (Barabas & Florescu 2020)

Barabasin ja Florescun (2020) tapaustutkimuksen kohteena oli laakereiden osia valmistavan yrityksen tuotantojärjestelmä. Malli suunniteltiin vastaamaan reaaliympäristön tapahtumia ja prosesseja kuten esimerkiksi kappaleen työstövaiheita, jolloin voidaan analysoida kappaletta sekä päätellä tuotantoon vaikuttavat vakiot. Tavoitteena oli tehdä

mahdollisimman yksinkertainen malli järjestelmästä. Lähtödata kerättiin suoraan todellisesta prosessista. Taloudellisia kustannuksia, energiankulutusta ja työntekijöiden vaikutusta ei huomioitu. (Barabas & Florescu 2020)

Simulointimenetelmän avulla voidaan graafisesti mallintaa tuotantojärjestelmän sekä synkronoituja että ei-synkronoituja samanaikaisia tapahtumia, valmistusprosesseja ja reaaliaikaisia ohjausjärjestelmiä. Simulointimalli sisältää yksityiskohtaiset kuvaukset erilaisista järjestelmäkonfiguraatioista sekä lisäksi sen avulla voidaan jokaiselle määrittää dynaaminen suorituskyky. Näistä tuloksista johdettiin oleelliset arviointikriteerit, jotka tässä tapauksessa olivat osien keskimääräiset odotusajat järjestelmässä. (Barabas & Florescu 2020)

Tuotannon virtaukset järjestettiin työpisteiden soveltuvuuden mukaisesti. Tällöin myös teknologiset ja toiminnalliset soveltuvuudet sekä informaation kulku huomioidaan. Lopuksi FMS-järjestelmän yleinen rakenne määritettiin jakamalla toiminnot objekteille ja määrittämällä vaadittavat yhteydet niiden välillä. (Barabas & Florescu 2020)

Simuloinnin lähtödata sisälsi analysoidusta tuotantojärjestelmästä

- tuotantovolyymin eli kuinka monta kappaletta käsiteltiin,
- tuotteiden prosessointia varten niitä vastaavat tekniset tiedot,
- materiaalinkäsittely ja -prosessointilaitteiston sekä muut FMS-järjestelmän komponentit,
- tyypillinen valmistettavien tuotteiden diversiteetti ja
- jonkin tuotteen esiintymisen frekvenssit tietyllä työpisteellä. (Barabas & Florescu 2020)

Simuloinnin avulla voitiin tunnistaa tuotannon pullonkaulat. Simulointiohjelmisto tarjoaa analyttisiä työkaluja, kuten pullonkaula-analyysin, statistiikan ja kuvaajien piirtämisen, mikä helpottaa tuotannon resurssien optimointia. Lisäksi se mahdollisti optimointien testaamisen, jolloin voidaan varmistaa jatkuva ja tasainen virtaus tuotannossa. Tuloksista voitiin päätellä, että merkittävin pullonkaula oli hiontavaiheen kohdalla, joten kapasiteettia on mahdollista kasvattaa lisäämällä vaiheen rinnalle toinen työpiste. Huomattiin myös, että keskimääräinen käyttöaste oli vain 25 %. Yksi kone oli täydellä kuormituksella ja loput olivat alikuormitettuja. Näin ollen on perusteltua pyrkiä tasoittamaan tuotannon kuormitusta. (Barabas & Florescu 2020)

Toisaalta Barabasin ja Florescun (2020) mukaan FMS-järjestelmälle on tyypillistä, että työpisteiden käyttöasteiden välillä on suuria eroavaisuuksia. Ideaalisella operoinnilla käyttöaste on 95–100 %, mutta tässä tapauksessa vastaavat luvut olivat 21–100 %.

Käyttöasteen ollessa pieni, aikaa kuluu huomattavasti arvoa tuottamattomaan työhön, kuten esimerkiksi työstökoneiden asetusten tekemiseen ja työasemille jonotukseen. Näiden lisäksi tuotannon tehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa toiminnalliset tai hallinnolliset pullonkaulat, työstökoneiden lukumäärä ja jonojen esiintymisfrekvenssit ja -todennäköisyydet. (Barabas & Florescu 2020)

Simuloimalla kokeiltiin useita erilaisia skenaarioita, minkä avulla saavutettiin parannuksia tuotantoon. Pullonkaula onnistuttiin tunnistamaan ja edelleen eliminoimaan sekä resurssien kuormitusta saatiin tasoitettua. Alkutilanteessa työasemien käyttöasteet olivat siis 21–100 %, mutta optimoinnin jälkeen ne olivat 90–100 %. Varsinaisen arvoa tuottavan työn määrä siis kasvoi merkittävästi ja hukaksi todettavat odotusajat vähenivät. (Barabas & Florescu 2020)

2.3.4 Tuotannonohjaus ja -suunnittelu

Banksin (1998) mukaan tuotannonsuunnittelun tavoitteena on

- toimittaa tuotteet toimitusaikaan mennessä olemassa olevilla resursseilla,
- minimoida asetusajat ja maksimoida henkilöstön ja koneiden käyttöasteet ja
- minimoida keskeneräinen tuotanto ja laatia standardoituja työtapoja.

Konepajassa prosessisuunnitelma määrittelee siellä tehtävät operaatiot ja niiden vaatimukset, joita ovat muun muassa resurssit ja vaadittu aika. Lisäksi prosessisuunnitelmassa määritellään operaatioiden järjestys. Konepajassa operaatioille voi olla useita vaihtoehtoisia resursseja, esimerkiksi rinnakkaisia työstökoneita tai työpisteitä. Operaatioita voidaan korvata toisilla operaatioilla perustuen esimerkiksi koneiden saatavuuteen tai käyttöasteiden maksimointiin. Konepajassa tilaukset eli valmistettavat tuotteet vaativat yleensä vähintään yhden operaation. Tuotannon aikataulutuksessa päätetään, mitkä tilaukset prosessoidaan tietyillä resursseilla lyhyellä aikavälillä. Tämän aikavälin valinta voi myös olla osa kyseistä päätöstä. (Banks 1998)

Banks (1998) esittelee toteutustavan simulointiperusteiselle aikataulutukselle yrityksessä, joka on erikoistunut valmistamaan useita erilaisia tuotteita teräsputkista. Tuotantoprosessi on monimutkainen ja sisältää useita eri vaiheita ja operaatioita. Tuotteiden laatuvaatimukset ovat tarkkoja, mutta myös toimitusajat on otettava huomioon. Tehtaassa on samanaikaisesti yli sata tuotetta tuotannossa. Tarkastelussa on yksi tuoteperhe, joka jaetaan edelleen alituoteperheisiin. Aluksi tuotteet on jaettava näihin alituoteperheisiin niin, että projektin tavoitteet voidaan saavuttaa lyhyessä ajassa ja niin, että simulointimalli on riittävän tarkka kuvaus reaali järjestelmästä. (Banks 1998)

Alustavan data-analyysin perusteella tuotteet jaettiin tuoteperheisiin ja niistä jokaiselle määritettiin reititykset taulukkolaskennan avulla. Insinöörit ja tuotannon henkilöstö verifioivat reititykset. Mallintaminen aloitettiin niiden tuoteperheiden osalta, jotka olivat helppo määrittää ja joille dataa oli jo kerätty riittävästi. Malli sisälsi useimpien simulointimallien tapaan

- lähteen ja silmukkaoperaatiot,
- saantotekijät, jotka voivat olla toimintojen funktioita,
- purku- ja kokoonpanotoiminnot,
- vaihtoehtoiset reititykset ja
- erilaisia vuororakenteita koneille ja eri operaattoreille.

Lisäksi malliin sisällytettiin joitakin spesifejä ominaisuuksia valmistusprosessista, kuten esimerkiksi ensimmäisen valmistettavan tuotteen tarkastus. (Banks 1998)

Kriteerit, jotka määrittivät projektin onnistumisen, olivat

1. malli kykenee ennakoimaan toimitusajat ja
2. malli kykenee esittämään tärkeiden koneiden ja työntekijöiden käyttöasteet.

Simulointikokeissa ajettiin erilaisia skenaarioita erilaisilla vuoroilla ja tilausten aikatauluuksilla. Simuloinnin pituus oli kuudesta kuukaudesta yhteen vuoteen. Simulointiin saatiin yrityksen seurantajärjestelmästä realistista tietoa muun muassa tilausmääristä, tuotteen tyypeistä (tuoteperhe), toimitusajoista ja tilauksen sijainnista tehtaassa. Simuloinnin ulostulona saatiin koneiden ja operaattoreiden käyttöasteet, keskimääräinen keskeneräinen tuotanto sekä jonojen suuruudet ja tilastotietoa käyttäjän määrittämistä tekijöistä, esimerkiksi tilausten myöhästymisistä. Lisäksi ulostulo sisälsi kaksi tiedostoa. Toisen avulla arvioitiin tilauksen mahdollista myöhästymistä vertaamalla suunniteltua toimitusta simulointiin. Toinen tiedosto sisälsi tilauksen seurantadataa, jota käytettiin GANTT- eli janakaavioiden piirtämiseen. (Banks 1998)

3. SIMULOINTITASOJEN MALLIEN YHDISTÄMINEN

3.1 Toteutus

Monitasoisen simulointimallin muodostamisen ensimmäinen vaihe on määritellä vaadittavat simulointitasot. Nyt käytetään luvussa 2.3 esitettyä jakoa, joka on valmistavassa teollisuudessa melko yleinen tapa (Herrmann et al. 2016). Simulointitasot ovat siis:

- fysikaalinen prosessi ja työstökone,
- tuotantosolu,
- tuotantoprosessi ja
- tuotannonohjaus ja -suunnittelu.

On kuitenkin huomattava, että simulointitasot ja niiden lukumäärä riippuvat aina käyttökohteesta.

Simuloinnin aikana dataa siirtyy eri tasojen välillä. Eri järjestelmien ja tasojen suunnittelijoiden on siis tiedettävä, mitä dataa muut järjestelmään kytketyt järjestelmät vaativat toimiakseen. Herrmann et al. (2016) ehdottavat matriisin käyttöä tähän tarkoitukseen. Yksinkertainen esimerkkimatriisi on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Datamatriisi. (Mukaillen lähdettä Herrmann et al. 2016.)

Ulostulo	Sisääntulo		
	Prosessimalli	Konemalli	Tehdasmalli
Prosessimalli		Lopetussignaali Aktiivisuus Prosessointiaika	
Konemalli	Aloitussignaali		Aktiivisuus Lopetussignaali Teho (kW) Hukkalämpö (kJ)
Tehdasmalli		Aloitussignaali	

Matriisi on selkeä työkalu havainnollistamaan datan kulkua tasojen välillä. Taulukossa 1 on vasemmalla ulostulosarakkeessa merkitty signaalien tai datan lähteet ja oikealla si-

sääntulosarakkeissa vastaavat mallit, jotka vastaanottavat signaalin tai datan. Tummennetut solut diagonaalissa esittävät mallin vaikutusta itseensä. Nyt esimerkiksi jonkin prosessin aloitussignaalin kulkua voidaan helposti seurata. Signaali lähetetään tehdasmallista konetasolle, josta se edelleen johdetaan prosessimallille. Signaali sisältää siis käskyn aloittaa fysikaalisen prosessin simulointi.

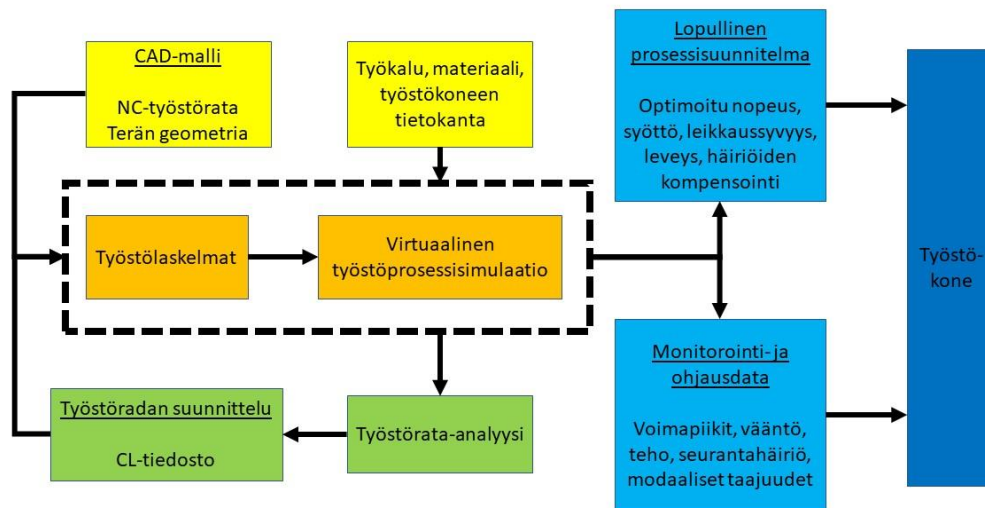
Tehdastason sisääntulo on peräisin myyntitilauksista, jotka sisältävät tiedon valmistusmääristä ja valmistettavien kappaleiden variaatioista. Ulostulona saadaan muun muassa toimitusajat sekä järjestelmän käyttöasteet. Konemallin ulostulosta saadaan tahtiajat ja kuvaukset valmistuskyvykkyydestä. Lopuksi prosessimallin ulostulona saadaan työn laatu sekä käytettävissä olevat valmistusmenetelmät. (Andersson & Nylund 2010)

Herrmann et al. (2016) esittävät kolme vaihtoehtoa eri simulointitasojen mallien yhteenliittämiseksi: offline-kytkentä, malli-integraatio ja yhteissimulointi. Offline-kytkennässä jokainen simulointimalli suoritetaan erikseen ja niiden tuottamat tulokset yhdistetään lopuksi. Malli-integraatiossa eri tasojen simulointimallit integroidaan samaan ympäristöön ja kaikki suoritetaan samanaikaisesti. Yhteissimuloinnissa mallit ovat toteutettu spesialisoituissa ympäristöissä ja ovat yhteydessä toisiinsa. Merkittävin ero malli-integraatioon on datan siirrossa eri tasojen välillä. Malli-integraatiossa eri tasojen välillä siirtyy dataa vain tapahtuma-aikoina tai muun määritellyn ajankohdan aikana. Yhteissimuloinnissa sen sijaan datan siirron on oltava kaikilla malleilla synkronoitua, koska eri mallien suoritajat voivat vaihdella. (Herrmann et al. 2016)

Andersson ja Nylund (2010) toteuttivat tasojen välisten vuorovaikutusten mallintamisen palvelupyynnöiden avulla. Makrotasolla palvelupyyntö on asiakkaan tekemä tilaus, joka lähetetään mesa-tasolle. Tilaus on jaettu yksittäisiin osiin ja palvelupyyntö sisältää tiedon valmistuserästä, joka voi olla yksi tai useampi osa. Valmistuserä voi myös olla kombinaatio useista makrotason pyynnöistä. Mesa-tason vastaus voi sisältää esimerkiksi valmistusajat ja -kustannukset. Mikäli mesa-tasolla on useampi mahdollinen palveluntarjoaja (esimerkiksi kaksi rinnakkaista työasemaa), viedään päätös käytettävästä palveluntarjoajasta makrotasolle kaikille palvelupyynnöille erikseen. Palvelu mesa-tasolta mikrotasolle jaetaan pienempiin osiin vastaavasti kuin makro- ja mikrotason välillä. Palvelupyyntö sisältää tiedon valmistettavan kappaleen ominaisuuksista. Vastaus sisältää työstöprosessin keston ja laadun ja tarvittaessa palveluntarjoaja päätetään mesa-tasolla vastaavasti kuin edellisessä vaiheessa. (Andersson & Nylund 2010)

3.2 Integroitu työstökoneen ja -prosessin simulointi

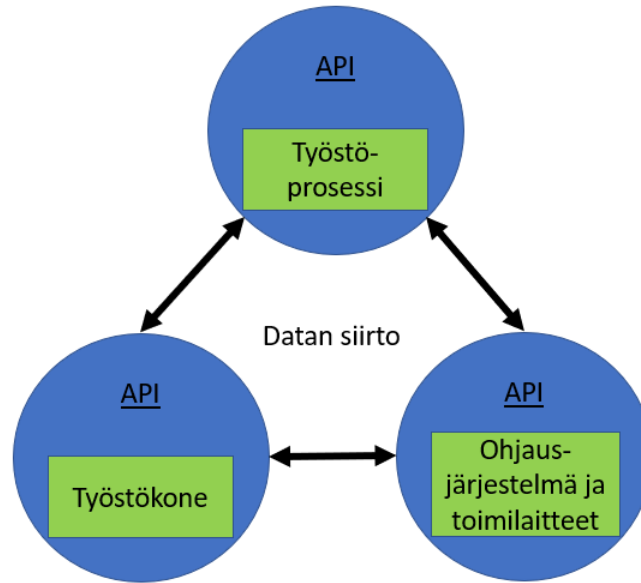
CAM-ohjelmistojen kehityskohteena on ollut fysikaalisen prosessin simuloinnin sisällyttäminen, jotta jo ensimmäinen valmistettava kappale olisi mahdollista valmistaa oikein ja tehokkaasti. Altintas et al. (2005) ehdottavat kuvassa 2 esitettyä arkkitehtuuria virtuaalisen työstöprosessin simulointiin.



Kuva 2: Virtuaalisen työstöprosessin simuloinnin ja optimoinnin arkkitehtuuri. (Muokattu lähteestä Altintas et al. 2005)

Työstettävän kappaleen CAD-malli ja NC-työstörata tuodaan standardin mukaisessa CL-tiedostossa käytetystä CAD/CAM-ohjelmistosta. Terän ja työstettävän kappaleen väliset leikkauspisteet työstöradalla määritetään syöttönopeuden lisäyskohdissa. Leikkauspisteen geometriaa vaaditaan työstöprosessin simuloinnin algoritmien ratkaisemiseen. Työstöprosessin simulointi perustuu metallin työstämisen mekaniikkaan ja dynamiikkaan ja se saa tiedon tarvittavasta työkalusta ja työstettävän kappaleen materiaalin ominaisuuksista työstökoneen tietokannasta. Näin ollen simulointi voi ennakoida leikkausvoimat, vääntömomentin, työkalun, kappaleen sekä kiinnityksen staattiset ja dynaamiset muodonmuutokset työstöradalla. Tällöin voidaan optimoida nopeus ja syöttö, kun tiedetään vakioina muun muassa työstökoneen lujuus tehon ja momentin suhteen sekä suurin sallittu lastun paksuus. (Altintas et al. 2005)

Valmistusprosessin kytketyn simuloinnin tavoitteena on yhdistää erilliset simulointimallit joidenkin rajapintojen kautta ja lisäksi sisällyttää simulointiin avustavat ohjelmistotyökalut, kuten esimerkiksi FEM-analyysit. Tämä simulointiympäristö on esitetty kuvassa 3, jossa on kolme alijärjestelmää, fysikaalinen työstöprosessi, ohjausjärjestelmä ja toimilaitteet sekä työstökone. (Altintas et al. 2005)



Kuva 3: Kytetty fyysikaalisen prosessin ja työstökoneen simulointi. (Muokattu lähteestä Altintas et al. 2005)

Kuvassa 3 on siis havainnollistettu, kuinka eri simulointimallit kytkeytyvät toisiinsa ohjelmointirajapintojen (eng. Application Programming Interface, API) kautta. Kuvassa vihreällä taustalla olevat nelikulmiot esittävät yksittäistä simulointimallia ja mallien välillä dataa siirtyy kuvassa olevien mustien nuolien mukaisesti ohjelmointirajapintojen (kuvassa sinisellä taustalla olevat ympyrät) kautta. Tällöin jokaista simuloitavaa kohdetta voidaan simuloida sille sopivimmassa ympäristössä ja samanaikaisesti muodostuu kokonaisvaltainen simulointimalli reaali-prosessista. Simuloinnin epälineaarisuuden takia simulointi täytyy suorittaa aikapohjaisena (Altintas et al. 2005).

Sisääntulodata simulointimallille saadaan CAM-ohjelmistolla tuotetusta NC-ohjelmasta, jolloin saadaan työstökoneen toimilaitteille nimellisarvot. Ohjausjärjestelmän ja toimilaitteiden malli generoi jokaiselle toimilaitteelle ja käytölle voiman, joka edelleen vaikuttaa työstökoneen mallissa. Työstöprosessissa syntyvät voimat vaikuttavat työstökoneen rakenteeseen, mikä johtaa työkalun keskipisteen siirtymään. Tämän siirtymän seurauksena välitön lastuamisalue siirtyy, mikä edelleen aiheuttaa muutoksen leikkausvoimissa. Näiden vuorovaikutusten simuloimiseksi tieto voimista ja siirtymistä siirtyy mallien välillä API:en kautta. (Altintas et al. 2005)

3.3 Tehdassimuloinnin haasteet ja rajoitteet

Yleisesti simuloinnin keskeisimpiä haasteita ovat muun muassa:

- Mallintaminen vaatii erikoisosaamista.

- Simuloinnin tuloksia voi olla haasteellista tulkita oikein. Suurin osa simuloinnin ulostuloista on satunnaismuuttujia, sillä ne perustuvat satunnaisiin sisääntuloihin. Näin ollen saattaa olla hankalaa päätellä, että onko jokin tulos seurausta järjestelmän keskinäisistä riippuvuuksista vai satunnaisuudesta.
- Mallintaminen ja analysointi saattaa olla kallista ja kestää pitkään. Simulointi ei välttämättä hyödytä projektia toivotusti, jos siihen ei ole riittävästi resursseja.
- Simuloinnin hyödyntäminen soveltumattomasti. Joissain tapauksissa ongelma on ratkaistavissa analyttisesti, mikä saattaa olla jopa kannattavampaa. (Banks 1998)

Toisaalta monet simulointiohjelmistot tarjoavat valmiita pohjia malleihin, jotka vaativat toimiakseen vain lähtödatan. Ohjelmistoihin on myös kehitetty analyysityökaluja, jotka helpottavat tulosten tulkintaa. Lisäksi tuotantojärjestelmät ovat yleensä niin kompleksisia, että analyttinen ratkaisu ei ole mahdollista. (Banks 1998) Toisaalta, ohjelmistojen valmiit pohjat ovat suhteellisen rajallisia ottaen huomioon valmistavan teollisuuden laajuuden (Bernidaki et al. 2014).

Osa kaupallisista NC-simulointijärjestelmistä sisältävät syötön optimoinnin, mutta niiden algoritmi ei perustu työstön mekaniikkaan eivätkä näin ollen jäljittele reaali-prosessia täsmällisesti. Toisaalta, kuten luvussa 3.2 mainitaan, todellisen prosessin integroiminen CAD/CAM-ohjelmistoihin on jatkuvasti tutkimuksen kohteena. (Altintas et al. 2005) Altintas et al. (2005) mukaan tarkkaa työstöprosessin simulointia rajoittaa myös terän ja työstettävän kappaleen välisten leikkauspisteiden pitkä laskenta-aika, sillä kappaleen geometriaa on päivitettävä työstön edetessä. Lisäksi erittäin monimutkaisten prosessien ja järjestelmien mallintaminen vaatii kompleksista simulointia, joka edelleen vaatii tehokkaita ja kalliita keskusyksiköitä (Bernidaki et al. 2014).

Monitasoisen simuloinnin haasteena on datan siirto eri tasojen mallien välillä. Kunnollisia, standardoituja tai integroituja keinoja datan siirrolle ei ole toistaiseksi kehitetty, mikä vaikeuttaa monitasoisen simulointimallin tasojen välisten riippuvuuksien mallintamista. (Bernidaki et al. 2014) Lisäksi Bernidakin et al. (2014) mukaan vain harvat simulointiohjelmistot tarjoavat mahdollisuuden tuotteen elinkaaren ja ympäristötekijöiden simulointiin.

4. SIMULOINTI TUOTANTOJÄRJESTELMIEN SUUNNITTELUN TUKENA

4.1 Tuotantojärjestelmien suunnittelu

Tuotantoprosessille on ominaista jatkuvasti pyrkiä parantamaan tuottavuutta, tuotannon prosesseja sekä toteutussuunnitelmaa. Lisäksi tuotantoprosessia on syytä rationalisoida kattavasti. Näiden tavoitteiden seurauksena on syntynyt uudenlaisia lähestymistapoja tuotantojärjestelmien suunnitteluun ja niiden teknisiin ratkaisuihin. (Javorova 2014)

Javorovan (2014) mukaan tuotantojärjestelmien suunnittelun tavoitteena on jatkuvasti

- selkeyttää ja yksinkertaistaa valmistusprosessia,
- lisätä ja parantaa tuotannonohjausta,
- vähentää tuotannon kustannuksia,
- lisätä tuotantomääriä,
- parantaa tuotannon laatua ja
- pyrkiä monotonisen ja rasittavan työn poistamiseen.

Tuotannon tehokkuuden edellytyksenä ovat teknisten muutosten toteuttaminen valmistusprosessissa, työn tuottavuuden lisääminen, uudet innovaatiot ja tuotannon nykyaikaistaminen tuotantoprosessien koneistamisella ja automatisoinnilla (Javorova 2014).

Tuotannon automatisoinnin merkittävä kasvu on seurausta materiaalinkäsittelyn vaatimuksista ja toistuvista työtehtävistä. Nykyään robotit tekevät monia työtehtäviä, joita ihmiset tekivät aikaisemmin johtuen työergonomiasta sekä -turvallisuudesta. Lisäksi automatisoinnin avulla tuotantoa saadaan tehostettua, jolloin yritysten on mahdollista lisätä tuotantomääriä. (Banks 1998)

Simulointia voidaan soveltaa laajasti tuotantojärjestelmien suunnittelussa ja kehittämisessä (Andersson & Nylund 2010). Suurten muutosten toteuttaminen tuotannossa on monille yrityksille riskialtista, koska esimerkiksi automatisointiprojektin toteuttaminen vaatii suuren määrän pääomaa. Tällöin simulointia voidaan hyödyntää uusien järjestelmien tai tuotantotapojen testaamiseen ennen kuin varsinaiselle tuotantolaitokselle tehdään muutoksia. Lisäksi tuotantojärjestelmät ovat usein hyvin monimutkaisia ja mahdollisia kombinaatioita lähtödatan muuttujiin perustuen on lukuisia. Järjestelmän analysoinnissa esimerkiksi taulukkolaskennan avulla ei välttämättä voida ottaa huomioon kaikkia järjestelmän osien välisiä riippuvuussuhteita. (Banks 1998)

Tarve muuttaa tuotantoa voi olla peräisin sisäisistä tai ulkoisista tekijöistä. Ulkoisia tekijöitä ovat muun muassa markkinatilanne ja ympäristötekijät ja sisäinen on esimerkiksi yrityksen strategiaan perustuva visio tuotantojärjestelmästä tulevaisuudessa. (Andersson & Nylund 2010)

4.2 Simulointiprojekti

Tuotantojärjestelmien simulointia varten on kehitetty lukuisia erilaisia metodeja (Cantot & Luzeaux 2011). Tässä luvussa esitellään vain yleinen viitekehys simulointiprojektin suorittamiselle onnistuneesti.

Useimmat simulointiprojektit voidaan jakaa karkeasti seuraaviin vaiheisiin:

1. ongelman määrittely,
2. tavoitteiden määrittely ja projektin organisointi,
3. järjestelmän analysointi ja mallintaminen,
4. mallin ohjelmointi,
5. ohjelman ja lähtöaineiston tarkistaminen,
6. mallin ja lähtöaineiston validointi,
7. simuloinnin suorittaminen,
8. tulosten kriittinen analysointi,
9. loppuraportin kirjoittaminen ja
10. sovelluskohteen toteutus. (Cantot & Luzeaux 2011)

Jokainen projekti alkaa yleensä ongelman täsmällisellä määrittämisellä asiakkaan kanssa. Koska simulointiprojektin edustajalla ja asiakkaalla on usein erilaiset taustat ja koulutukset, on tässä vaiheessa erittäin tärkeää päästä hyvään yhteisymmärrykseen, jotta saadaan toteutettua asiakasta todella hyödyttävä simulointi. Jos asiakas haluaa esimerkiksi tehostaa tuotantoa 30 %, on väärinkäsityksien välttämiseksi tarpeen määrittellä yhdessä mittarit, joilla tuotannon tehokkuus mitataan. (Cantot & Luzeaux 2011)

Seuraavaksi määritellään tavoitteet, jotka pyritään saavuttamaan projektin päätteeksi. Tavoitteiden on oltava mitattavia, täsmällisiä, järkeviä ja hyödyllisiä. Samanaikaisesti projektipäällikkö suunnittelee projektin aikataulua ja resurssien käyttöä. Lisäksi on selvítettävä henkilöstö- ja teknisten resurssien riittävyys projektin vaatavuus ja laajuus huomioon ottaen. On myös tärkeää selvittää jo olemassa oleva tieto aiheesta eli voidaanko

muun muassa aikaisemmin tehtyjä simulointimalleja ja tuloksia käyttää hyödyksi. (Cantot & Luzeaux 2011)

Järjestelmän analysointi on olennaista tehdä, jotta sitä voidaan onnistuneesti simuloida. Tässä vaiheessa määritellään muun muassa järjestelmän tilamuuttujat. Analysoinnin tavoitteena on muodostaa kokonaiskuva järjestelmän toiminnasta. Järjestelmää voidaan mallintaa esimerkiksi UML (eng. Unified Modeling Language) -kieltä hyödyntäen, joka käyttötapauksen kuvaamisen lisäksi helpottaa eri simulointimallien dokumentointia. Järjestelmän analysointi aloitetaan yleensä staattisella analyysillä, jonka jälkeen tehdään myös dynaaminen analysointi. (Cantot & Luzeaux 2011)

Staattisessa analysoinnissa jätetään huomioimatta järjestelmän muutokset ajan suhteen. Tässä vaiheessa on määritettävä:

- tulot ja lähdöt,
- järjestelmän muodostavat objektit sekä resurssit,
- vuorovaikutukset objektien välillä ja
- järjestelmän ympäristö.

Järjestelmän ympäristöllä tarkoitetaan niitä objekteja, jotka eivät itsessään kuulu järjestelmään, mutta vaikuttavat sen toimintaan. (Cantot & Luzeaux 2011)

Järjestelmän muutokset ajan suhteen huomioidaan dynaamisessa analyysissä, jossa määritetään:

- tilamuuttujat ja järjestelmän komponenttiobjektit,
- tilamuuttujien muutoksia koskevat säännöt,
- tapahtumat ja
- tapahtumien esiintymistä koskevat säännöt. (Cantot & Luzeaux 2011)

Järjestelmän analysoinnin jälkeen voidaan aloittaa mallinnus. Mallinnuksessa on otettava huomioon simuloinnin tavoite, joka määrittää muun muassa vaaditun simulointitarkkuuden. Lisäksi on selvitettävä saatavilla olevat resurssit eli voidaanko simulointi suorittaa ja onko mahdollista kerätä riittävästi dataa mallin parametrisointiin. (Cantot & Luzeaux 2011)

Yleisesti käytettyjä simulointirakenteita on neljä erilaista: prosessivuorovaikutus- (eng. process-interaction), tapahtuma-ajotus- (eng. event-scheduling), toimintoskannaus (eng. activity scanning) sekä kolmivaihemetodi. Prosessivuorovaikutusmetodi on edellä

mainituista intuitiivisin rakenne. Siinä simulointiohjelma jäljittelee objektin virtausta järjestelmän läpi. Objekti etenee mallissa, kunnes sitä viivästetään, se aloittaa toiminnon tai poistuu järjestelmästä. Kun objektin eteneminen pysähtyy, simuloinnin kello siirtyy seuraavana tapahtuvan minkä tahansa objektin etenemisaikaan. Prosessivuorovaikutusmetodi siis kuvaa järjestyksessä kaikki prosessin vaiheet, jotka ovat vuorovaikutuksessa kyseisen objektin kanssa. (Banks 1998)

Tapahtuma-ajoitusmetodin periaatteena on edistää aikaa, kunnes seuraavaksi tapahtuu jotain. Siinä yleensä vapautetaan resurssi (esimerkiksi työstökone), jonka jälkeen objektit allokoidaan uudelleen ajoittamalla toiminnot, jotka ovat niille nyt vapaana. Kello siirtyy seuraavaan tapahtumaan, joka on yleensä toiminnon loppuminen. Tämän jälkeen tarkastetaan, jos jokin toiminto voi alkaa edellisen loppumisen seurauksena. (Banks 1998)

Mallintamisen lisäksi simuloinnin validiuteen vaikuttaa merkittävästi myös kerätty data ja sen laatu. Simulointi sisältää yleensä suuren määrän dataa, joka voidaan jakaa seuraavasti:

- järjestelmän parametrit,
- alkuarvot,
- validointiin sekä kalibrointiin käytettävä data ja
- ulostulodata.

Järjestelmäparametrit määrittävät täsmälliset käyttöolosuhteet mallille ja mahdollistavat sen kalibroimisen. (Cantot & Luzeaux 2011) Parametrisoinnin tavoitteena on siis antaa järjestelmälle sen tyypilliset ominaisuudet. Esimerkiksi työstökoneen parametreja ovat muun muassa työstö- ja asetusajat ja tuotantolinjan parametreja muun muassa koneiden määrä, etäisyydet, työntekijöiden määrä sekä vuorojärjestelmä. Mallin parametrisointi sisältää myös stokastisten prosessien määrittämisen. Stokastiset prosessit mahdollistavat reaali järjestelmän satunnaiset tapahtumat simulointimallissa. Järjestelmän tilastollinen analyysi mahdollistaa tapahtumien todennäköisyyksien määrittämisen ja hyödyntämisen simulointimallissa. (Cantot & Luzeaux 2011)

Alkuarvojen sekä -tilanteen perusteella valitaan edelleen tilamuuttujille tietyt alkuarvot. Ulostulodatasta on huomattava, että se sisältää raakojen tulosten lisäksi muun muassa suoritusparametrit, joita ovat esimerkiksi satunnaissiemen ja päivämäärä, tallennetun sekä tilastollisen datan. Datalla on siis merkittävä rooli mallintamisen ja simuloinnin aikana ja sen käyttö täytyy suunnitella yhtä hyvin kuin prosessin muutkin toiminnot. Tämä onkin suhteellisen usein yksi simulointiprojektin suurimmista haasteista. (Cantot & Luzeaux 2011)

Toinen haaste simulointiprojektin aikana on kerätä riittävä määrä riittävän laadukasta dataa. Datan lähteitä on useita, mutta jokaisella on tiettyjä rajoitteita. Datan lähteet voidaan karkeasti jakaa seuraaviin luokkiin.

- Kokeellinen data on kerätty reaalijärjestelmällä suoritetuilla kokeilla. Se on luotettavaa, mutta pätee yleensä vain pieneen osaan validiusalueesta, jonka simulointimalli kattaa. Tällöin dataa usein ekstrapoloidaan, joka vähentää sen oikeellisuutta.
- Mallinnettavan järjestelmän teknisestä dokumentaatiosta peräisin oleva data. On huomattava, että dokumentaatiota ei välttämättä ole aina saatavilla. Lisäksi data voi yksinkertaisesti olla peräisin insinöörien ammattitaidosta.
- Valideiksi tunnettujen jo olemassa olevien simulointien tulosten ja datan hyödyntäminen. Tätä dataa voidaan käyttää esimerkiksi simulointimallin kalibrointiin sekä validointiin. (Cantot & Luzeaux 2011)

Kerätty data ei välttämättä suoraan vastaa simulointimallille asetettuja vaatimuksia ja saattaa vaatia käsittelyä. Datan on siis simulointimallin tapaan käytävä läpi verifiointi- ja validointiprosessi. (Cantot & Luzeaux 2011) Validointi on prosessi, jossa määritetään, että vastaako simulointimalli mallinnettavaa järjestelmää niin kuin simulointiprojektin tavoitteissa on määritelty. Validointi siis vastaa kysymykseen: Onko malli käyttökelpoinen? Validointi on tärkeä vaihe projektissa. Jos malli ei ole riittävän tarkka, simuloinnin tulosten perusteella tehdyt johtopäätökset ovat luultavasti virheellisiä ja niistä saattaa seurata kalliita toimenpiteitä. Validointi on suositeltavaa suorittaa riippumatta siitä, että onko kyseessä jo olemassa oleva järjestelmä vai täysin uusi. (Law 2019) Verifiointissa sen sijaan varmistetaan, että malli vastaa alkuperäisiä vaatimuksia, jotka ovat projektin alussa määritelty. Verifiointi ei näin ollen ota kantaa siihen, että vastaako malli todellista järjestelmää.

Validin mallin avulla voidaan tehdä samankaltaisia johtopäätöksiä kuin reaalijärjestelmällä suoritetuilla kokeilla. Validoinnin haasteellisuus perustuu mallinnettavan järjestelmän kompleksisuuteen sekä sen olemassaoloon. Vasta suunnitteluvaiheessa olevan tuotantojärjestelmän simulointimallin validointi on selvästi vaikeampaa. Lisäksi jo olemassa olevasta järjestelmästä voidaan kerätä dataa mallintamiseen ja validointiin. Simulointimalli on aina approksimaatio todellisesta järjestelmästä eikä absoluuttisen tarkkaa mallia ole tarkoituksenmukaista tai edes mahdollista tehdä. Professori George Box on tiivistänyt asian hyvin: ”Kaikki mallit ovat väärin, mutta jotkin niistä ovat hyödyllisiä.” Simulointi tulee aina kehittää tietyille tavoitejoukolla. Malli, joka on validi tietyille tavoitejoukolla, ei välttämättä ole sitä jollekin toiselle. Joka kerta, kun samaa simulointimallia

sovelletaan uuteen käyttötarkoitukseen, on sen validisuutta tarkasteltava uudestaan. Lisäksi on huomattava, että validointiin ei tule suhtautua niin, että malli validoidaan, jos projektin budjetti ja aikataulu sallivat sen. (Law 2019)

Validoinnin jälkeen suoritetaan varsinainen simulointi. Simulointiohjelma lukee sisääntulodataa ja suorittaa laskutoimitukset määrätyle ajalle tai tietyn ilmiön tai prosessin loppumiseen asti. Lopuksi se tuottaa tulokset automaattisesti. Monissa simulointiohjelmistoissa on mahdollisuus myös graafiseen suorittamiseen, mikä helpottaa simuloinnin seuraamista. Tällöin simuloinnin kulkua voidaan ohjata esimerkiksi tauottamalla sitä silloin, kun tietyn ajanhetken tilaa halutaan tutkia tarkemmin. Lisäksi joidenkin muuttujien muokkaaminen on mahdollista simuloinnin aikana. Etenkin monitasoisessa simuloinnissa seuranta on erityisen tärkeää suorituksen kompleksisuuden takia. (Cantot & Luzeaux 2011)

Simuloinnin tulokset eivät välttämättä vastaa odotuksia. Esimerkiksi stokastisissa malleissa tämä voi olla seurausta jonkin todella epätodennäköisen tapahtuman tapahtumisesta. Tällöin on harkittava, otetaanko kyseinen tulos mukaan analysointiin vai jätetäänkö se huomioimatta, jotta se ei vaikuttaisi statistiikkaan. Joskus tulokset voivat kuitenkin olla yksinkertaisesti myös virheellisiä, jolloin mallista täytyy etsiä virheiden aiheuttajat ja korjata ne. (Cantot & Luzeaux 2011)

Tulosten analysointiin on olemassa useita menetelmiä ja siihen soveltuvia tietokoneohjelmia. Tyypillisesti yritetään selvittää järjestelmän parametreille simuloinnin perusteella optimaalisimmat arvot. (Cantot & Luzeaux 2011)

5. TULOSTEN ANALYSOINTI

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia monitasoisen tehdassimuloinnin soveltamista tuotantojärjestelmien suunnittelussa ja sen etuja verrattuna yksitasoiseen simulointiin. Tutkimuskysymykset olivat:

K1. Mitä on monitasoinen tehdassimulointi ja miten eri tasoja voidaan simuloida?

K2. Mitä hyötyjä monitasoisella mallilla on verrattuna yksitasoiseen simulointiin?

K3. Miten simulointia voidaan hyödyntää tuotantojärjestelmien suunnittelussa?

Monitasoinen tehdassimulointi on tuotannon eri tasojen eli alijärjestelmien simulointimallien integrointia yhdeksi kokonaisvaltaiseksi malliksi. Huomattavimpia etuja verrattuna yksitasoiseen simulointiin ovat mahdollisuus käyttää jo olemassa olevia simulointimalleja tietyn rajoituksen sekä simulointiajan lyheneminen. Lisäksi eri tasojen järjestelmiä voidaan simuloida niille sopivimmassa ympäristössä, mikä mahdollistaa täsmälliset tulokset. Näiden ohella myös skaalautuvuus on merkittävä etu monitasoisessa simuloinnissa. Mallin skaalautuvuuden ansiosta kaikkia järjestelmän tasoja on mahdollista analysoida tarkasti.

Kappaletavaratuotannossa yleisiä tuotannon simuloitavia tasoja ovat fysikaalinen prosessi ja työstökone, tuotantosolu sekä koko tuotantoprosessi. Lisäksi simulointia voidaan hyödyntää myös tuotannonohjauksessa ja -suunnittelussa. Työstökoneiden prosesseja ja niiden ilmiöitä voidaan simuloida nykyaikaisilla CAM-ohjelmilla tai elementtimenetelmää hyödyntäen. Tällöin simuloinnin tavoitteena on saada tietoa esimerkiksi työkalun kulumisesta, työstöajasta ja työn laadusta. Fysikaalisten työstöprosessien simulointi eroaa merkittävästi muiden tasojen simuloinnista ja se saattaa vaatia erilaista osaamista, kuten elementtimenetelmän tuntemista. Muiden tasojen simulointiin voidaan hyödyntää esimerkiksi tapahtumapohjaista simulointia.

Tuotantosolun suunnittelussa simulointia hyödynnetään esimerkiksi layout-suunnittelussa, jolloin tavoitteena on materiaalivirtojen minimointi. Tuotantoprosessin simuloinnin kohteena on koko tuotantolinja ja tavoitteena voi olla muun muassa käyttöasteiden maksimointi, läpimenoajan minimointi ja kapasiteetin kasvattaminen. Huomattavaa on, että tuotantosolun ja -prosessin simuloinnissa on paljon yhteneväisyyksiä samankaltaisten tavoitteiden ja menetelmien perusteella. Tuotannosuunnittelussa simulointia voidaan hyödyntää esimerkiksi toimituspäivien ja vaadittavien resurssien ennakoimiseen. Tällöin tuotantoa voidaan suunnitella niin, että koneiden käyttöasteet ovat mahdollisimman korkeat ja arvoa tuottamaton työ on minimoitavissa.

Monitasoisen tehdassimuloinnin suurimpana haasteena on datan siirto eri tasojen välillä, mikä rajoittaa tasojen välisten riippuvuussuhteiden mallintamista. Monitasoisen simuloinnin mallintaminen on huomattavasti yksitasoista mallia laajempaa ja vaativampaa. Näin ollen myös simulointiprojektin kesto ja kustannukset voivat kasvaa.

Simulointi on erittäin tehokas työkalu tuotantojärjestelmien suunnittelussa. Simulointia voidaan hyödyntää uusien järjestelmien suunnitteluvaiheessa sekä jo olemassa olevien järjestelmien operatiivisessa toiminnassa. Suunnittelussa simulointia voidaan hyödyntää esimerkiksi teknologisten hankintojen varmentamiseen ja layout-suunnitteluun. Lisäksi simuloinnin avulla voidaan varmistaa uuden tuotantolaitoksen sujuva ylösajo. Simuloinnilla voidaan kokeilla lukuisia erilaisia skenaarioita nopeammin, edullisemmin ja turvallisemmin kuin oikealla järjestelmällä. Tällöin myös ongelmat ylösajossa voidaan ennakoita ja niihin on mahdollista reagoida jo suunnitteluvaiheessa. Operatiivisessa toiminnassa simulointia hyödynnetään usein tuotannon optimointiin. Tällöin tavoitteena on muun muassa tunnistaa ja eliminoida pullonkaulat sekä maksimoida koneiden ja henkilöstön käyttöasteet.

Tulosten perusteella simulointi on erittäin tehokas, hyödyllinen ja monipuolinen työkalu tuotantojärjestelmien suunnittelussa koko järjestelmän elinkaaren ajan. Tehdassimuloinnin merkitys nykyaikaisessa teollisuudessa on merkittävä ja teollisuus 4.0:n myötä se tulee varmasti kasvamaan.

Tutkimuksen lähdeaineisto kerättiin vertaisarvioituista tieteellisistä artikkeleista ja konferenssijulkaisuista. Lisäksi hyödynnettiin myös luotettavia alan kirjoja. Yleisesti ottaen simuloinnista löytyi kattavasti tietoa. Toisaalta integroidusta työstöprosessin ja -koneen simuloinnista oli hankalampaa löytää tietoa. Tähän vaikuttavat käytetyt hakusanat sekä kielitaito. Suurin osa käytetystä lähdemateriaalista oli suhteellisen uutta, mutta myös 1990-luvulla julkaistuja lähteitä hyödynnettiin. Tästä ei kuitenkaan merkittävästi seuraa virhettä, koska lähdemateriaalia tukevat myös muut tutkimukset. Lisäksi käsitteistö ja määritelmät, joihin vanhempaa lähdettä hyödynnettiin, eivät ole juuri muuttuneet. Tuotannon eri tasojen simuloinnin tapaustutkimukset perustuvat kontekstinsa vuoksi pääosin yhteen tutkimukseen. Nämä tutkimukset ovat kaikki vertaisarvioituja sekä valideja, mutta muitakin toimivia menetelmiä on olemassa.

6. YHTEENVETO

Nykyään tuotantojärjestelmät ovat monimutkaisia ja tuotantoa pyritään jatkuvasti parantamaan ja tehostamaan. Tuotantokustannusten kasvu motivoi yrityksiä entistä enemmän panostamaan tuottavuuden maksimoimiseen. Tuotannosta on siis pyrittävä tunnistamaan ja poistamaan tai minimoimaan arvoa tuottamattomat työvaiheet, joita valmistavassa teollisuudessa ovat muun muassa työstökoneiden asetusajat ja jonot. Lisäksi asiakastarpeet muuttuvat yksilöllisemmiksi ja samalla korkea laatu sekä ympäristötietoisuus halutaan varmistaa. Yritysten ja tuotantojärjestelmien on mukauduttava näihin vaatimuksiin pysyäkseen kilpailukykyisinä.

Simulointi on vakiintunut tärkeäksi työkaluksi tuotantojärjestelmien suunnittelussa. Se tarjoaa mahdollisuuden ratkaista hyvin laajasti erilaisia ongelmia niin suunnitteluvaiheessa, tuotannon ylösajossa sekä operatiivisessa toiminnassa. Lisäksi simuloinnin haasteet ja haitat ovat yleensä suhteellisen pieniä.

Tehdassimulointi käsitetään usein tarkoittavan suuren tuotantolinjan simulointia, jossa yleensä simuloidaan esimerkiksi tuotannon materiaalivirtoja. Tämä on tietysti hyvin tärkeä simuloinnin kohde, mutta se jättää huomioimatta tuotannon muiden tasojen vaikuttavat tekijät. Monitasoinen tehdassimulointi on tuotannon eri tasojen eli alijärjestelmien simulointimallien integrointia yhdeksi kokonaisvaltaiseksi malliksi. Sen avulla voidaan yksitasoista simulointia tarkemmin huomioida tasojen väliset riippuvuussuhteet, mikä on erittäin tärkeää, kun tuotantojärjestelmät ovat monimutkaisia ja tavoitteena on saada täsmällisiä tuloksia koko järjestelmän toiminnasta. Monitasoinen simulointi mahdollistaa siis syvällisemmän analyysin järjestelmästä kuin yksitasoinen malli.

Simulointi mahdollistaa tuotantojärjestelmän turvallisen ja kustannustehokkaan testaamisen muun muassa layoutin, laitehankintojen ja aikataulutuksen kannalta. Erilaisten skenaarioiden testaaminen reaalijärjestelmällä olisi usein tuotannolle haitallista, kallista tai jopa mahdotonta. Simulointi helpottaa merkittävästi tuottavuuden parantamista, sillä esimerkiksi materiaalivirtojen intensiteettiä simuloimalla voidaan nopeasti tunnistaa tuotannon pullonkaulat ja edelleen etsiä optimaalinen ratkaisu niiden eliminoimiseen.

Valmistavan teollisuuden suurena trendinä nykyään ovat joustavat valmistusjärjestelmät eli FMS-järjestelmät sekä uudelleenkonfiguroitavat RMS-järjestelmät, koska ne mahdollistavat nopeasti mukautumisen muuttuviin asiakastarpeisiin ja markkinatilanteeseen. Simuloinnilla voidaan varmistaa järjestelmien muuttuvien layouttien toimivuus ja tuottavuus.

den maksimointi. Lisäksi uusien ja mukautettujen tuotteiden valmistuslaatu on varmistettava. Näin ollen etenkin monitasoisella simuloinnilla on FMS- ja RMS-järjestelmien analyysissä suuri potentiaali.

Tuotannon eri tasojen simulointimenetelmät ovat nykyään hyvin tiedossa ja niitä myös sovelletaan teollisuudessa. Tulevaisuudessa lisätutkimusta vaadittaisiin eri tasojen mallien integroimista varten, missä suurimpana haasteena on datan siirto mallien välillä. Malleja voidaan yhdistää esimerkiksi joidenkin ohjelmointirajapintojen kautta, jolloin josta alijärjestelmää voidaan simuloida sille optimaalisimmassa ympäristössä. Toisaalta datan siirto helpottuisi huomattavasti, jos tasoja simuloitaisiin samassa ympäristössä. Tämä on kuitenkin haastavaa eri tasojen simulointimenetelmien eroavaisuuksien vuoksi.

LÄHTEET

Abdelatif, N., Emad, Y., Fahim, I., Kassem, S. S., Saleh, A. & Yaser, S., 2021. FlexSim Simulation to Enhance Productivity of a Production Cell: A Case Study. 2021 3rd Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES). Piscataway: IEEE.

Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M. & Witt, S., 2005. Virtual Machine Tool. CIRP annals.

Andersson, P. H. & Nylund, H., 2010. Simulation of service-oriented and distributed manufacturing systems. Robotics and computer-integrated manufacturing.

Bangsow, S., 2010. Manufacturing Simulation with Plant Simulation and Simtalk Usage and Programming with Examples and Solutions. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Banks, J. 1998. Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice. Wiley.

Barabas, S. A. & Florescu, A., 2020. Modeling and simulation of a flexible manufacturing system — a basic component of industry 4.0. Applied sciences.

Berlec, T., Herakovic, N., Zerovnik, J. & Zupan, H., 2017. Layout optimization of a production cell. International journal of simulation modelling.

Bernidaki, D. Doukas, M. & Mourtzis, D., 2014. Simulation in Manufacturing: Review and Challenges. Procedia CIRP.

Cantot, P. & Luzeaux, D., 2011. Simulation and modeling of systems of systems. 1st edition. London: ISTE.

Carson, I. 2005. Introduction to modeling and simulation. Proceedings of the 37th Conference on Winter Simulation.

Dantan, J. Y., El Mouayni, I., Etienne, A., Lux, A. & Siadat, A., 2020. A simulation-based approach for time allowances assessment during production system design with consideration of worker's fatigue, learning and reliability. Computers & industrial engineering.

Delbrügger, T., Biermann, D., Meißner, M., Myrzik, J., Rossmann, J., Wirtz, A., & Wiederkehr, P., 2019. Multi-level simulation concept for multidisciplinary analysis and

optimization of production systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

Dengzhe, M., Juanqi, Y., Wenbin, Z., Xiumin, F. & Ye, J., 2006. Production engineering-oriented virtual factory: a planning cell-based approach to manufacturing systems design. *International journal of advanced manufacturing technology*.

Herrmann, C., Kurle, D., Schönemann, M. & Thiede, S., 2016. Multi-level simulation in manufacturing companies: The water-energy nexus case. *Journal of Cleaner Production*.

Javorova, A., 2014. CA systems and modularity principles as tools for flexible and efficient production systems design. *Applied Mechanics and Materials*.

Law, A., 2019. How to build valid and credible simulation models. 2019 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE Press.

Negahban, A. & Smith, J. S., 2014. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of manufacturing systems*.

Rao, S. S., 2018. *The finite element method in engineering*. Sixth edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Reinhart, G., & Wünsch, G., 2007. Economic application of virtual commissioning to mechatronic production systems. *Production Engineering*, Berlin, Germany.

Salminen, A., 2011. Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyyppeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopisto.

Wegener, K., Weikert, S. & Zschippang, H. A., 2022. Face-gear drive: Simulation of shaping as manufacturing process of face-gears. *Mechanism and machine theory*.