

Annika Pankko

# TYÖNTEKIJÖIDEN OMINAISUUKSIEN SIMULOINTI TEHDASSIMULOINNISSA

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Helmikuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Annika Pankko: Työntekijöiden ominaisuuksien esittäminen tehdassimuloinnissa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikan tutkinto-ohjelma  
Helmikuu 2022

---

Tehdassimulointi on yksi teollisuuden digitaalisista työvälineistä. Tehdassimulointi perustuu tapahtumapohjaiseen simulointiin ja sen avulla voidaan ratkaista tuotannon ongelmia, suunnitella tuotantolaitoksia tai niiden osia sekä optimoida tuotannon eri osa-alueita. Usein tehdassimuloinnissa ihmisen oletetaan toimivan kuin kone. Todellisuudessa ihmisten välillä on kuitenkin eroja, eikä ihminen toimi yhtä mekaanisesti kuin kone. Tämä voi aiheuttaa eroja simuloinnin sekä reaaliaikaisen tulosten välille etenkin silloin, kun ihmisellä on suuri rooli simuloitavassa kokonaisuudessa.

Tämän tutkimuksen tavoite on selvittää, miten työergonomiaa ja ihmisen kyvykkyyksiä sekä ominaisuuksia pystytään simuloimaan tehdassimulointiohjelmissa, jotka eivät ole keskittyneet ainoastaan ihmisen simulointiin vaan yleisemmällä tasolla tuotannon simulointiin. Tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuuskatsausta sekä tapaustutkimusta. Kirjallisuuskatsauksessa selvitetään työn taustalla oleva teoria liittyen tehdassimulointiin ja työergonomiaan sekä aiempien tutkimusten tuloksia. Aineistona kirjallisuuskatsauksessa on käytetty vertaisarvioituja tieteellisiä artikkeleita ja tutkimuksia tehdassimuloinnista ja ihmisen ominaisuuksien esittämisestä tehdassimuloinnissa. Työergonomiaosuudessa aineistona on käytetty alan julkaisuja ja erityisesti julkaisuja liittyen työergonomiaan tuotantoympäristössä. Tapaustutkimuksessa etsitään kolmesta eri tehdassimulointiohjelmasta työergonomiaan ja ihmisen kyvykkyyksiin sekä ominaisuuksiin liittyviä simulointimahdollisuuksia.

Työ rajattiin koskemaan vain tehdassimulointia. Lisäksi työssä tutkitaan kolmea tehdassimulointiohjelmää, jotka eivät ole tarkoitettu ihmisen simulointia varten, vaan laajemmin tuotannon simulointiin, jossa ihminen on vain resurssi. Näistä tehdassimulointiohjelmissa tutkittiin vain työergonomiaan sekä ihmisen ominaisuuksiin ja kyvykkyyksiin liittyviä ominaisuuksia.

Työn päätuloksena saatiin, että tehdassimulointiohjelmassa simulointimalliin pystyy ihmiselle antamaan joitakin ominaisuuksia, mutta harvemmin simuloinnista saadaan ulostulona ihmiseen liittyviä tuloksia. Työergonomian parantamiseksi ainoa tieto, joka simulointimallista saadaan tuloksena, oli tutkittavissa ohjelmissa työntekijän kävelemä matka. Työntekijöihin ja työergonomiaan liittyvien asetusten vaikutus näkyy useimmiten siinä, miltä simulointimalli näyttää eikä niinkään sen toiminnassa. Toistaiseksi tehdassimulointiohjelmissa työntekijää ei mallinneta niin tarkkaan, kuin joissain tapauksissa voisi olla tarpeen. Joka tapauksessa se, kuinka yksityiskohtaisesti työntekijää on tarve mallintaa, tulee miettiä tapauskohtaisesti jokaisessa simulointiprojektissa. Tulevaisuudessa olisi hyvä kehittää tehdassimulointiohjelmiin ominaisuuksia, joiden avulla ihmistä pystyttäisiin simuloimaan monipuolisemmin ja realistisemmin osana tuotantoa.

Avainsanat: tehdassimulointi, työergonomia, tapahtumapohjainen simulointi, tehdassimulointiohjelma, ihminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TEHDASSIMULOINTI .....	3
2.1 Perusteet ja käsitteet.....	3
2.2 Käyttökohteet.....	4
2.3 Hyödyt ja haasteet .....	5
2.4 Tiedonhankinta simulointimallia varten.....	5
2.5 Ihminen ja tehdassimulointi .....	6
3. TYÖERGONOMIA .....	8
3.1 Työergonomia ja hyvä työpiste.....	8
3.2 Ihmisen fyysiset ominaisuudet .....	9
3.3 Ympäristön vaikutukset työntekoon.....	9
4. IHMINEN TEHDASSIMULOINTIOHJELMISSA.....	11
4.1 Tutkittavat tehdassimulointiohjelmat.....	11
4.2 Työntekijän ominaisuuksien ja kyvykkyyksien simulointi tehdassimulointiohjelmissa .....	11
4.3 Työergonomian simulointi tehdassimulointiohjelmissa .....	14
5. TULOSTEN ANALYSOINTI .....	18
6. YHTEENVETO.....	22
LÄHTEET .....	24

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

3D engl. three dimensional, kolmiulotteinen

# 1. JOHDANTO

Valmistavalle teollisuudelle asetetaan suuria vaatimuksia muuttuvassa ja globalisoituvassa maailmassa. Tuotteiden tulee olla laadukkaita ja kustomoituja, mutta valmistamisen kustannustehokasta samalla, kun aikavaatimukset ovat kovia. (Zhang et al. 2018) Termillä ”Teollisuus 4.0” (engl. Industry 4.0) viitataan siihen, että käsillä on neljäs teollinen vallankumous, johon on vaikuttanut teknologian nopea kehittyminen sekä ympäristön asettamat muutostarpeet. Digitaaliset menetelmät ja keksinnöt ovat jo muokanneet teollisuutta ja tulevat tekemään sitä tulevaisuudessakin. (Lasi et al. 2014) Yksi digitaalisista, tuotantoa avustavista menetelmistä on simulointi.

Siitä huolimatta, että digitalisaatio on käynnissä, on Lindin et al. (2008) mukaan ihmiseläkin edelleen vahvuutensa teollisuudessa. Ihmisen älykkyys ja mukautuvuus ovat eri luokkaa kuin koneiden, vaikkakin koneet ovat tarkkoja, nopeita ja pystyvät käsittelemään suuria kuormia. Kun tuotantoa simuloidaan, on ihmisen mallintaminen koneita vaikeampaa, johtuen ihmisten eroavaisuuksista ja ennustamattomuudesta. (Lind et al. 2008)

Myös Baines et al. (2004) vahvistavat, että ihmisen toiminta on harvemmin yhtä tarkasti simuloitu kuin koneiden. Golda et al. (2019) mainitsevatkin, että usein simulointimalleissa ihmisen oletetaan toimivan kuin kone. Jos ihmisellä on kuitenkin suuri vaikutus reaali maailmassa systeemin suorituskykyyn, voi simulointimalli, jossa ei ole tarpeeksi yksityiskohtaisesti otettu huomioon ihmisen suorituskykyä, antaa liian hyvän kuvan systeemin suorituskyvystä. (Baines et al. 2004)

Vaikka ihmisen simulointi tehdassimulointiohjelmassa voi olla merkittävässä roolissa ja on haastavampaa kuin koneiden simulointi, ei aiemmin ole juurikaan tutkittu, miten ihmisen simulointi on otettu huomioon tehdassimulointiohjelmassa. Tämän työn tavoitteena on tutkia, miten tällä hetkellä työergonomiaa on mahdollista simuloida ja mitä ominaisuuksia ihmiselle on annettu tehdassimulointiohjelmassa, jotka eivät ole keskittyneet ainoastaan ihmisen simulointiin vaan yleisemmällä tasolla tuotannon simulointiin. Työssä kerrotaan yleisesti tehdassimuloinnista sekä sen hyödyistä ja haasteista.

Tutkimuskysymykset ovat

- 1) Mitä on tehdassimulointi?

- 2) Miten tehdassimuloinnissa otetaan huomioon työergonomia?
- 3) Mitä ominaisuuksia ja kyvykkyyksiä ihmiselle on annettu tehdassimulointiohjelmassa?

Työ rajataan käsittelemään vain tapahtumapohjaista tehdassimulointia ja ihmisen ominaisuuksien ja kyvykkyyksien sekä työergonomian simulointia tehdassimulointiohjelmissa. Työssä tutkitaan kolmea tehdassimulointiohjelmää. Nämä kolme ohjelmaa valittiin sillä perusteella, että niitä pystyy käyttämään valmistavan teollisuuden prosessien ja systeemien simulointiin. Lisäksi kaikissa ohjelmissa työntekijän toimintaa ja ihmistä pystytään simuloimaan jotenkin. Nämä kolme ohjelmaa ovat myös yleisesti hyvin käytettyjä ja Tampereen yliopistossa opetetuimpia tehdassimulointiohjelmiä.

Työ suoritettiin kirjallisuuskatsauksena ja tapaustutkimuksena. Kirjallisuuskatsauksessa tutustuttiin olemassa oleviin tutkimuksiin aiheesta sekä kartoitettiin työn taustaa ja määriteltiin työn taustalla oleva teoria. (Tuomi et al. n.d.) Työn toinen tutkimusmenetelmä on tapaustutkimus, jossa pyritään tuottamaan yksityiskohtaista tietoa rajatuista tapauksista (Jyväskylän yliopisto 2015). Tässä työssä tapaustutkimuksen kohteena oli kolme tehdassimulointiohjelmää, joista selvitettiin, kuinka monipuolisesti niissä on mahdollista mallintaa ihmisen kyvykkyyksiä ja ominaisuuksia.

Työn teoriaosa alkaa luvusta kaksi tehdassimuloinnin yleisten periaatteiden, käsitteiden sekä hyötyjen ja haasteiden esittelyllä. Luvussa kaksi kerrotaan myös, miksi ja mihin tehdassimulointia voidaan käyttää. Lisäksi määritellään termi tapahtumapohjainen simulointi, sillä tehdassimulointi perustuu juuri tapahtumapohjaiseen simulointiin. Luvussa kolme käsitellään työergonomiaa ja sen osa-alueita: fyysistä, kognitiivista ja organisatorista ergonomiaa, sekä hyvää työpistettä ja sen ominaisuuksia. Samassa luvussa esitellään myös ihmisen ominaisuuksia ja ympäristön vaikutusta ihmisen työskentelyyn.

Luvussa neljä esitellään aluksi tapaustutkimuksen kolme tehdassimulointiohjelmää. Sen jälkeen kerrotaan, mitä ominaisuuksia ohjelmista etsittiin ja mitä löydettiin. Analysointi ja päätelmät ovat luvussa viisi, jossa käsitellään, miten monipuolisesti ihmisen kyvykkyyksien ja ominaisuuksien sekä työergonomian simulointi tutkituissa tehdassimulointiohjelmissa on toteutettu, ja pitäisikö siihen olla paremmat mahdollisuudet.

## 2. TEHDASSIMULOINTI

Tämä luku käsittelee tehdassimulointia yleisesti. Luvussa esitellään tapahtumapohjaisen simuloinnin periaatteita sekä kerrotaan tehdassimuloinnin käsitteistä, käyttökohteista, hyödyistä ja haasteista. Viimeinen alaluku käsittelee ihmisen simulointia osana tehdassimulointia.

### 2.1 Perusteet ja käsitteet

Simulointi on reaali maailman prosessien ja systeemien esittämistä mallilla (Banks 2003; Carson 2005). Banks (2003) kuitenkin toteaa, ettei malli koskaan vastaa täysin reaali maailmaa, sillä se on vain malli, vaikkakin mallin tulee olla tarpeeksi kompleksinen kuvaamaan reaali maailmaa mahdollisimman tarkasti. Carsonin (2005) mukaan syitä, miksi pitäisi simuloida, on tarve vertailla, analysoida ja arvioida. Simuloinnilla pystytään etsimään systeemin ongelmia sekä syitä ongelmiin ja ennustamaan systeemin suorituskykyä (Carson, 2005).

Qiaon ja Wangin (2021) mukaan valmistavan teollisuuden systeemit ovat monimutkaisia tapahtumadynaamisia systeemejä (engl. discrete event dynamic system). Brailsford et al. (2014, s.14) kuvaavat tapahtumapohjaisen simuloinnin (engl. discrete event simulation) niin, että yksittäiset kappaleet virtaavat läpi prosessin, joka sisältää jonoja ja aktiviteetteja. Aktiviteetin aikana systeemin tila ei muutu vaan vasta aktiviteetin päätyttyä. Jos tehdassimulointi toteutettaisiin jatkuvana simulointina (engl. continuous simulation), olisi se raskasta ja tehotonta, sillä systeemin tila muuttuu suhteellisen harvoin ja jatkuva simulointi vaatisi todella pientä ajan porrastusta. Siitä syystä käytetään termiä tapahtuma (engl. event), joka on se hetki, kun systeemin tila muuttuu eli esimerkiksi juuri kappaleen saapuminen, aktiviteetin alkaminen tai loppuminen. Aika hyppii näiden tapahtumien välillä niiden hetkien yli, kun systeemissä ei tapahdu tilan muutosta eli ei ole tapahtumia. Tapahtumapohjainen simulointi ja sen ajankulku perustuu juuri tapahtumiin. (Brailsford et al. 2014, s.14) Lisäksi Carson (2005) mainitsee, että tapahtuma saattaa saada aikaan seuraavan tapahtuman.

Chungin (2004, luku 1, s. 8–9) mukaan simuloinnin pääkomponentit ovat kappaleet, jonot ja resurssit. Kappaleet voivat olla ihmisiä asiakkaina tai tehdasympäristössä ne ovat yleensä työstettäviä kappaleita. Jono kuvaa sitä, kun kappaleet odottavat, että pääsevät työstettäväksi tai ihmiset palveltavaksi. Resurssit työstävät ja prosessoivat kappaleita eli

jonossa kappaleet odottavat, että resurssi on vapaa heille. Resurssit voivat olla esimerkiksi työstöasemia tai työntekijöitä, jotka työstävät kappaleita. (Chung 2004, luku 1, s. 8–9)

## 2.2 Käyttökohteet

Tapahtumapohjaista simulointia voidaan käyttää tehtaiden ja valmistavan teollisuuden lisäksi myös julkisissa laitoksissa sekä palvelualalla, kuten esimerkiksi terveydenhuollossa, armeijassa, liikenteessä ja tietoliikenteessä. (Banks 1998) Tässä työssä keskitytään kuitenkin nimenomaan tehdassimulointiin eli valmistavan teollisuuden ja tehtaiden näkökulmaan.

Carson (2005) luettelee, että tehdassimulointia voidaan käyttää, kun suunnitellaan uutta järjestelmää tai tehdään investointeja. Jos vanhassa järjestelmässä on jonkin tason kompleksisuutta, esimerkiksi eri komponenttien välillä on paljon vuorovaikutussuhteita, tehdassimulointi auttaa vaikutuksien selvittämisessä, kun tehdään muutoksia järjestelmään. Lisäksi tehdassimuloinnin visuaalisuutta voidaan käyttää hyväksi käyttäjäkoulutuksessa tai yrityksen johtajien vakuuttamisessa. Tehdassimulointi on hyvä työkalu, kun analyyttiset keinot eivät riitä ongelman ratkaisemiseksi. (Carson 2005)

Qiao ja Wang (2021) kertovat lisäksi, että tapahtumapohjaista tehdassimulointia käytetään valmistavassa teollisuudessa erilaisten asioiden optimointiin. Ensinnäkin tehtaan pohjapiirustusta voidaan optimoida, mikä tarkoittaa tarvittavan kaluston määrittämistä ja sijoittamista tehtaan lattialle. Myös kuljettavia reittejä voidaan optimoida. Simulointia voidaan käyttää hyväksi, kun suunnitellaan materiaalin jakelua käyttäjille. Tuotantolinjan toimintaa voidaan myös simuloinnin avulla aikatauluttaa sekä suunnitella. Toisaalta voidaan myös tutkia, kuinka tuotantolinjan osat saadaan mahdollisimman tehokkaasti toimimaan yhteen. (Qiao & Wang 2021)

Chung (2004, luku 2, s. 10–11) kertoo, että simulointiprojektin alussa määritetään ongelma, johon simulointiprojektilta halutaan vastaus. Ongelman määrittämisen jälkeen tulee miettiä, onko simulointi ylipäätään se työkalu, joka auttaa ongelman ratkaisussa. Lisäksi ongelman kuvauksen avulla tiedetään, mitä simuloinnin on tarkalleen tarkoitus tutkia. (Chung 2004, luku 2, s. 10–11) Simulointimallia muodostaessa ongelman kuvaus auttaa siinä, kuinka paljon ja mitä osia systeemistä mallinnetaan (Chung 2004, luku 4, s. 1).



## 2.3 Hyödyt ja haasteet

Tehdassimuloinnin hyötyjä ovat esimerkiksi se, että erilaisia muutoksia ja skenaarioita pystyy kokeilemaan ilman kalliita laiteinvestointeja tai muutoksia tehtaan pohjapiirustuksessa. Simuloinnissa hyödyllinen ominaisuus on myös ajan hallinta, sillä aikaa pystyy hidastamaan tai nopeuttamaan sen mukaan, mitä haluaa tarkastella simuloinnilla. (Banks 2003) Chung (2004, luku 1, s. 4) kertoo lisäksi, että simulointi on mahdollisesti ainoa keino, jolla erilaisia skenaarioita ja tilanteita voidaan testata ilman, että häiritään samalla reaali maailman systeemiä. Banks (2003) toteaa, että simuloinnin avulla näkee, miksi asiat tapahtuvat. Joskus tosin vastausten tulkitseminen saattaa olla vaikeaa tai on haastavaa erottaa, mikä on merkittävä tulos ja mikä vain satunnaisuutta. Simuloinnilla saa suunnitelmista muodostettua visuaalisen kuvan, ja simulointi antaa analysoitua, joskaan ei aina täysin oikeaa tietoa tilanteesta, ettei tarvitse tehdä päätöksiä tuntuman perusteella. (Banks 2003)

Vaikka tehdassimulointiin liittyy paljon hyötyjä ja hyviä puolia, on hyvä myös tiedostaa simuloinnin haasteet. Chungin (2004, luku 1, s. 5–6) mukaan haasteet eivät niinkään liity suoraan simulointiin, vaan ennemmin koko simulointiprojektiin. Jos lähtötiedot simulointimalliin eivät ole valideja, eivät myöskään simuloinnin tulokset ole. Lähtötietojen kerääminen on haastava, mutta tärkeä osa projektia eikä erinomainen simulointimalli pysty paikkaamaan puutteita lähtötiedoissa. Jos ratkaistavana on kompleksinen ja monimutkainen ongelma, simulointi ei luultavasti yksinkertaista tilannetta tai ratkaisua, vaan myös ratkaisu on kompleksinen. Pitää myös tiedostaa, ettei simulointi yksinään ratkaise ongelmaa, se antaa vain apua ja mahdollisia ratkaisuja. Simulointimallien rakentaminen vaatii usein ammattitaitoa ja voi olla myös kallista. Simulointitulosten tulkitseminen saattaa vaatia tilastojen tulkitsemistaitoa, sillä usein tulokset ovat tilastoja. (Chung 2004, luku 1, s. 5–6)

## 2.4 Tiedonhankinta simulointimallia varten

Skooghin ja Johanssonin (2008) mukaan tehdassimulointiprojekteissa lähtötiedon kerääminen ja hallitseminen on tärkeä, mutta myöskin aikaa vievä prosessi. Laadukas lähtötieto on tärkeässä asemassa koko projektin kannalta, sillä tehdassimulointimallit perustuvat pitkälti laadukkaisiin lähtötietoihin. (Skoogh & Johansson 2008). Kuitenkin Skooghin ja Johanssonin (2007) tutkimuksen mukaan lähtötietojen kerääminen ja hallitseminen vie keskimäärin koko simulointiprojektista ajallisesti 31 prosenttia, eli ison osan ajasta.

Tehdassimuloinnin lähtötiedot voivat Chungin (2004, luku 5, s. 2–3) mukaan olla esimerkiksi koneisiin liittyen laitevalmistajalta saatavissa tai tuotteisiin liittyen asiakkaan vaatimuksia. Jos mallinnetaan olemassa olevaa järjestelmää, osa lähtötiedoista voi olla olemassa olevan järjestelmän tietoja. (Chung 2004, luku 5, s. 2–3)

Launiksen (2011a, s. 358) mukaan tietoa erityisesti ergonomiasuunnitteluun voidaan kerätä rekistereistä, tilastoista, raporteista, kyselyistä tai teemahaastatteluista. Erilaisia raporteja ja tilastoja, joista saadaan työergonomiaan ja -hyvinvointiin liittyviä tietoja voivat olla esimerkiksi sairaus- ja poissaolotilastot tai työtaturmaraportit (Launis 2011a, s. 358).

## **2.5 Ihminen ja tehdassimulointi**

Baines et al. (2004) esittävät, että tapahtumapohjaisilla simulointiohjelmilla pystytään mallintamaan koneet hyvinkin yksityiskohtaisesti, mutta yleensä työntekijät ovat vain yksinkertaisesti mallinnettuja resursseja. Myös Golda et al. (2019) vahvistavat, että usein simulointimalleissa ihmisen oletetaan toimivan kuin kone. Bainesin et al. (2004) mukaan tämä on ongelma silloin, kun ihmisellä onkin suuri rooli simuloitavassa kokonaisuudessa. Syy, miksi ihmisen kohdalla todellisuus ja simulointimalli usein eroavat, on se, että ihmiset ovat hyvin erilaisia. Simuloinnissa usein keskitytään pelkästään teknisiin näkökulmiin, eikä työntekijöihin ja heidän suorituskyykyynsä tai ominaisuuksiin, jolloin simulointimalli saattaa antaa liian hyvän kuvan systeemin suorituskyyvystä. Tähän ongelmaan apuna voisi olla ihmisten yksityiskohtaisempi ja realistisempi esitys, joka kuvaisi todennukaisemmin heidän käytöstään ja suorituskyykyään. (Baines et al. 2004)

Edellistä puoltaa myös se, että Lind et al. (2008) ovat sitä mieltä, että edelleen ihmisellä on digitalisaatiosta huolimatta omat vahvuutensa teollisuudessa. Ihminen on kuitenkin koneita mukautuvampi ja älykkäämpi, vaikka häviääkin koneille kuormankantokyyvessä, nopeudessa ja tarkkuudessa. (Lind et al. 2008)

Goldan et al. (2019) mukaan ihmisen simulointi on haastavaa, sillä ei ole olemassa yhtä mallia, joka kuvaisi jokaisen ihmisten vuorovaikutusta esimerkiksi koneen kanssa pätevästi. He esittävät, että työntekijän työaika sisältää ensinnäkin paljon häiriötä, jotka vievät aikaa suorittavalta työltä, kuten työpisteen valmistelu, tuotteiden tarkistaminen, työpisteen siivoaminen työn jälkeen ja ruokatauot. Lisäksi ihminen saattaa itse aiheuttaa käytöksellään työntekoon häiriöitä, jotka saattavat johtaa jopa työtaturmaan. (Golda

et al. 2019) Ihmisen aiheuttamia häiriöitä voi Goldan et al. (2019) mukaan mallintaa simuloitavissa esimerkiksi koneiden häiriöaikoina, jos tiedetään todennäköisyys häiriöiden aiheutumiselle.

## 3. TYÖERGONOMIA

Tämä luku käsittelee työergonomiaa. Työergonomiasta esitellään kaikki osa-alueet, mutta eniten keskitytään fyysiseen ergonomiaan sekä ihmisen fyysisiin ominaisuuksiin. Lisäksi käsitellään ympäristön vaikutuksia työskentelyyn.

### 3.1 Työergonomia ja hyvä työpiste

Koneiden rajoitukset, mahdollisuudet ja tekniset tiedot ovat helposti saatavilla ja selvitettäviä, mutta ihmisen vastaavat ominaisuudet ovat vaikeampi selvittää. Työergonomia tulee kuitenkin ottaa suunnittelussa huomioon, kuten koneidenkin rajoitteet otetaan niiden toimintamahdollisuuksien selvittämiseksi. Tätä varten tarvitaan tietoa työntekijöiden osaamisesta ja kyvykkyyksistä. Suunnittelussa pitää kuulla eri asiantuntijoita, kuten työntekijöitä itse, esimiehiä, kunnossapitoa, työterveyshoitohenkilökuntaa sekä suunnittelijoita, sillä heillä kaikilla on asiantuntemusta työnkuvasta eri näkökulmasta. (Toivonen 2020)

Toivosen (2020) mukaan työergonomia käsittää paljon muutakin kuin vain ergonomisen työasennon: ihmisen terveys, hyvinvointi ja turvallisuus ovat kaikki osa työergonomiaa unohtamatta työn tehokkuutta ja sujuvuutta. Ergonomia voidaan jakaa fyysiseen, kognitiiviseen ja organisatoriseen ergonomiaan, joista fyysinen tarkoittaa esimerkiksi asentoa, liikelaajuutta ja voimankäyttöä eli työn fyysisiä vaatimuksia suhteessa ihmisen fyysiseen toimintakykyyn. Kognitiivinen ergonomia on tiedon sekä laitteiden käsittelyä ja organisatorinen sitä, miten työt on yrityksessä organisoitu, työaika järjestetty ja organisaation sisäinen viestintä toteutettu. (Toivonen 2020)

Hyvä työpiste on Toivosen (2020) mielestä mukautuva erilaisille ihmisille, turvallinen, terveellinen ja toimiva. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, ettei työtä tehdessä tarvitse käyttää liikaa voimaa ja asento on hyvä ja sitä voi muuttaa. Hyvällä työpisteellä virheiden tekeminen on pyritty estämään, ja työnteko on turvallista. Tiedon tulee olla helposti näkyvillä sekä saatavilla ja yhteydenpidon kollegoihin onnistua. Hyvällä työpisteellä lisäksi ympäristötekijät, kuten lämpö, valaistus ja äänenvoimakkuus, on otettu huomioon. Koonpano- tai linjastotyössä ei työtahdi saisi olla liian sidottu linjan nopeuteen. Yksipuolisessa työssä työkierto eli esimerkiksi tunnin välein vaihtuva työtehtävä on suositeltu tapa

vaihdella erilaisia rasituksia. (Toivonen 2020). Yksipuolinen työ aiheuttaa myös psyykkistä kuormitusta, alentaa herkästi vireystilaa ja saattaa aiheuttaa jopa stressireaktiolle ominaisia fyysisiä oireita (Seppälä 2011, s.109).

Harriotin ja Adamsin (2013) mukaan ihmisen suorituskyvyllä on tärkeä rooli systeemin suorituskykyyn. Ihmisen suorituskykyyn vaikuttaa moni sisäinen ja organisatorinen tekijä sekä ympäristötekijä, kuten sää, äänimaisema, väsymys, stressi, fyysinen kuormitus sekä monen asian yhtäaikainen tekeminen. (Harriot & Adams 2013)

Koneturvallisuuteen liittyen on olemassa useita standardeja, jotka käsittelevät esimerkiksi koneiden kulkuaukkojen mittoja, vaarasignaaleja, merkinantolaitteiden ja ohjaimien ergonomisia vaatimuksia sekä koneen käytön suositeltuja voimarojoja. (SFS Online) Ergonomiasuunnittelussa tulee standardien lisäksi ottaa huomioon työturvallisuus-, työterveyshuolto- sekä konelaki ja erilaiset direktiivit (Lehtelä 2011).

### **3.2 Ihmisen fyysiset ominaisuudet**

Ihmisen fyysisiin mittoihin vaikuttaa Launiksen (2011b, s. 50–51) mukaan esimerkiksi ihmisen ikä, sukupuoli, etninen tausta, asuinalue ja elintavat. Standardissa SFS-EN ISO 7250-1:2017 on annettu ihmisen perusmitat teknistä suunnittelua varten (SFS-EN ISO 7250-1:2017).

Voiman tuottokyvystä Louhevaara ja Launis (2011, s. 74–75) kertovat myös, että yksilöllisten erojen lisäksi sukupuoli vaikuttaa voiman tuottoon niin, että naisten voiman tuotto on keskimäärin vain kaksi kolmasosaa miesten voiman tuotosta. Etenkin käsien voimaan sukupuolella on iso vaikutus: naisilla käsien voiman tuotto on vain hieman reilu puolet miesten vastaavasta. Yksilölliset erot voivat olla jopa niin suuria, että vahvimman yksilön voiman tuotto on kaksin- tai kolminkertainen heikoimman yksilön voiman tuottoon verrattuna. (Louhevaara & Launis 2011, s. 74–75)

### **3.3 Ympäristön vaikutukset työntekoon**

Ympäristön vaikutukset työskentelyyn tulee ottaa huomioon ergonomiaa suunniteltaessa. Näihin kuuluvat esimerkiksi valaistus, äänet sekä työympäristön lämpötila. Lehtelän ja Launiksen (2011, s. 266) mukaan valaistuksen tulee olla sellainen, että työtehtävät pystytään suorittamaan, vireys pysyy yllä, se ohjaa huomion haluttuihin kohteisiin sekä takaa turvallisen työskentelyn ja työympäristön. Valon sijainti ei saa aiheuttaa näkemistä

haittaavia varjoja, eikä valo saa heijastua pinnoista suoraan silmiin. (Lehtelä & Launis 2011, s. 270)

Lehtelä ja Launis (2011, s. 278) kertovat, että äänimaiseman työympäristössä pitäisi olla sellainen, ettei liiallinen melu aiheuta terveystarpeita, vaikeutta keskittymistä tai peitä alleen tärkeitä merkki- tai varoitussääniä. Lämpöoloista Lehtelä ja Launis (2011, s. 284) mainitsevat, että työympäristössä sekä liika kuumuus että kylmyys lisäävät työn kuormittavuutta etenkin raskaissa töissä. Teollisuudessa etenkin kuumaa hohkaavat prosessit ja laitteet vaikuttavat työskentelylämpötilaan. Työ saattaa myös olla fyysistä, mikä pitää ottaa huomioon ympäristön lämpötilassa. Sopivaa lämpötilaa kuvaa termi lämpöviihtyvyys. Se tarkoittaa lämpötila-aluetta, joka tuntuu ihmisestä miellyttävältä. Lämpöviihtyvyys riippuu esimerkiksi päällä olevasta vaatteiden määrästä ja vuodenaikasta. (Lehtelä & Launis 2011, s. 283–284)

## 4. IHMINEN TEHDASSIMULOINTIOHJELMISSA

Tämän luvun alussa esitellään tapaustutkimuksen kolme tehdassimulointiohjelmää. Sen jälkeen kerrotaan, mitä työntekijöihin liittyviä ominaisuuksia ja kyvykkyyksiä kyseisistä ohjelmista etsittiin ja mitä löydettiin. Ohjelmista etsittiin myös työergonomiaan liittyviä ominaisuuksia, joita käsitellään tämän luvun lopussa.

### 4.1 Tutkittavat tehdassimulointiohjelmat

Visual Componentsilla on valmistukseen keskittynyt 3D (kolmiulotteinen, engl. three dimensional) simulointiohjelma (Sun et al. 2021). Visual Componentsin ohjelmassa on suuri katalogi valmiita komponentteja ja erityisesti olemassa olevia teollisuuden robotteja. Simulointimalleja voi Visual Componentsin ohjelmassa tutkia myös virtuaalitodellisuuden avulla. (Visual Components 2022) Koodikielenä käytetään Pythonia.

Plant Simulation on Siemensin Tecnomatix-portfolioon kuuluva ohjelma, jota käytetään tapahtumapohjaiseen simulointiin. (Sun et al. 2021) Tecnomatix-portfolio sisältää useita ohjelmia liittyen digitaaliseen valmistukseen (Siemens 2022b). Plant Simulation on keskittynyt tehtaiden simulointiin eri tasoilla globaalista tuotannosta yksittäisiin tuotantolinjoihin (Siemens 2022a). Plant Simulation sisältää myös energia-analyysin, jonka avulla voi arvioida tuotannon ja eri vaiheiden kuluttaman energian määrän. (Siemens 2022a) Plant Simulationin koodikielenä on SimTalk.

FlexSim on tapahtumapohjainen prosessien simulointiohjelma (Sun et al. 2021), jolla voidaan 3D-simuloida ja tuottaa analyysia prosesseista (FlexSim 2022a). FlexSimissa käytetään prosessien rakentamiseen prosessikaaviota (FlexSim 2022b). Ohjelmaa voidaan teollisuuden lisäksi käyttää muillakin toimialoilla kuten materiaalin käsittely, terveydenhuolto ja varastointi (FlexSim 2022a).

### 4.2 Työntekijän ominaisuuksien ja kyvykkyyksien simulointi tehdassimulointiohjelmissa

Edellä mainituista tehdassimulointiohjelmissa etsittiin seuraavia työntekijän ominaisuuksien ja kyvykkyyksien simulointiin liittyviä tekijöitä: työntekijän ulkonäön visuaalisuus ja vastaavuus reaali maailman kanssa sekä liikkuminen, työntekijälle asetettavat ominaisuudet sekä työntekijöiden osaaminen. Työntekijän liikkuminen, osaaminen ja hänelle

asetettavat ominaisuudet vaikuttavat siihen, kuinka realistisen kuvan simulointimalli antaa todellisuudesta, jos todellisessa prosessissa on oikeita ihmisiä työskentelemässä. Lisäksi työntekijän visuaalisuus eli se, kuinka hyvin simulointimallin työntekijä vastaa miitoiltaan ja ulkonäöltään todellista ihmistä, helpottaa simuloinnin seuraamista. Työntekijän ominaisuuksia ei välttämättä yleensä hyödynnetä tehdassimuloinnissa. Tarkoituksena oli selvittää, kuinka monipuolisesti tehdassimulointiohjelmassa on mahdollista asettaa työntekijälle ominaisuuksia ja onko niillä vaikutusta simulointituloksiin. Taulukossa 1 listaus etsityistä ominaisuuksista.

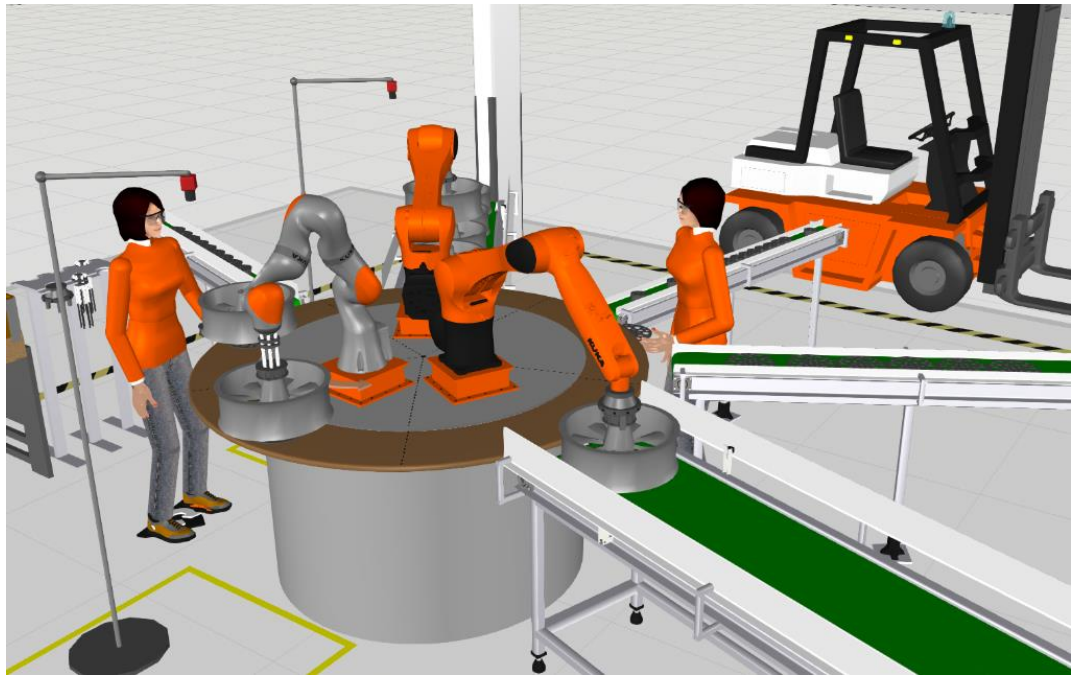
Taulukko 1. *Ihmisen ominaisuuksiin ja kyvykkyyksiin liittyvät etsityt ominaisuudet.*

<b><i>Etsitty ominaisuus</i></b>
Ihmisen pituus
Sukupuoli ja sen vaikutus
Ihmisen liikkuminen ja liikkumisnopeus
Työntekijöiden osaamisen kuvaaminen ja erot osaamisessa
Työntekijän ohjautuminen työntekoon
Kuorman nostamisen ja asetusten laittamisen kesto

Kaikissa tutkittavissa tehdassimulointiohjelmissa työntekijät on esitetty ihmisen näköisinä hahmoina. FlexSimissä työntekijän mitat, sukupuolen, ihonvärin ja jopa vaatteet voi valita itse, myös Visual Componentsin ohjelmassa työntekijän pituus ja sukupuoli on mahdollista asettaa itse. Ihminen on yksityiskohtaisimmin mallinnettu Visual Componentsin ohjelmassa ja epätarkimmin Plant Simulationissa. FlexSimissä pystyy valitsemaan työntekijälle erilaisia animaatioita, kun hän odottaa seuraavaa työtehtävää ja liikkuu. Visual Componentsin ohjelmassa taas pystyy valitsemaan erilaisia animaatioita, kun työntekijä nostaa tai laskee kuormaa. Nämä ominaisuudet ja valinnat eivät kuitenkaan vaikuta varsinaisesti simulointimallin toimintaan mitenkään, vaan ovat vain ulkonäöllisiä tekijöitä. Kuvasta 1 näkee, kuinka Visual Componentsin ohjelmassa komponentit ja työntekijät ovat hyvin yksityiskohtaisesti mallinnettu ja robotit sekä muut komponentit ovat aidon kokoisia, jolloin tehtaan tai työpisteen pohjapiirustus on mahdollista suunnitella



reaalimaailman kaltaiseksi. Kuvassa on Visual Components Premiumin valmis simulointimalli Indexing label layout.



**Kuva 1.** Visual Componentsin ohjelmassa työntekijät ovat yksityiskohtaisesti mallinnettu ja komponentit aidon kokoisia. Muokattu lähteestä. (Visual Components Premium)

Työntekijälle pystyy jokaisessa ohjelmassa määrittämään kävelynopeuden, Visual Componentsin ohjelmassa jopa erikseen kävelynopeuden kuorman kanssa käveltäessä sekä ilman ja FlexSimissä myös työntekijän kiihtyvyyden määritettyyn kävelynopeuteen. Lisäksi jokaisessa ohjelmassa työntekijöille pystytään määrittämään kävelyreitit eri paikkojen välillä. Plant Simulationissa on ennalta määritettyjen kävelyreittien lisäksi vaihtoehtoina, että ohjelma itse päättää työntekijän kävelyreitit niin, että työntekijä väistää esteet tai sitten epärealistinen vaihtoehto, jossa työntekijä vain ilmestyy tarvittavalle työpisteelle.

Plant Simulationissa on mahdollista asettaa aika, joka työntekijältä kuluu kuorman poimimiseen ja laskemiseen. Työpisteille voi antaa lisäksi ajan, joka kuluu työntekijältä työpisteen valmisteluun ennen varsinaista työtehtävän suorittamista ja sen jälkeen työpisteen alasajoon. Visual Componentsin ohjelmassa asetetaan jokaiselle työtehtävälle sii-

hen kuluva aika, joten nämä yllä mainitut asiat voi ottaa huomioon kokonaisajassa. Kuvasssa 2 näkyy, kun Plant Simulationin valmiissa Factory 51 -simulointimallissa työntekijät kantavat kappaleita työpisteeltä toiselle.



**Kuva 2.** Plant Simulationissa työntekijät kantamassa kappaleita työpisteeltä toiselle. Muokattu lähteestä. (Plant Simulation)

Plant Simulationissa työntekijää ohjaa työnjohtaja (engl. broker), joka purkaa tehtävien jonoa työntekijöille. Visual Componentsin ohjelmassa työntekijöitä ohjataan ohjauskomponentin (engl. controller) avulla. FlexSimissä työtehtävät työntekijöille määrittää prosessikaavio.

Sitä, että eri työntekijät osaavat eri työvaiheita, eivätkä kaikki pysty tekemään kaikki työtehtäviä, on Plant Simulationissa mahdollista mallintaa niin, että työntekijät jaetaan ryhmiiin (engl. worker group) ja ryhmille määritetään työtehtävät, joita ryhmän työntekijät pystyvät tekemään. Visual Componentsin ohjelmassa työtehtävät määritetään suoraan yksittäisille työntekijöille.

### 4.3 Työergonomian simulointi tehdassimulointiohjelmilla

Tehdasympäristölle ominaisia tilanteita ja vaaranpaikkoja fyysisen ergonomian kannalta on esimerkiksi suurien kuormien nostaminen tai toistuva kuorman nostaminen. Työpisteiden tilat tai kulkuväylät ovat mahdollisesti ahtaita, sillä niihin on yleensä sijoitettu koneita, työtasoja ja välivarastoja, ja kulkuväylillä saattaa kulkea sekä ihmisiä että ajoneuvoja. Työpisteellä tulee ottaa huomioon turvallinen työskentely koneiden kanssa ja mahdolliset turvaetäisyydet. Tehdasympäristössä saattaa olla paljon melua ja valaistuksen tulee mahdollistaa tarkka ja turvallinen työskentely. Lisäksi kävelyetäisyydet työpisteeltä toiselle tai työpisteen ja varaston välillä voivat olla pitkiä.

Tehdassimulointiohjelmista etsittiin seuraavia fyysisen työergonomian simulointiin liittyviä tekijöitä: työtasojen korkeuden säätö ja vaikutus työskentelyyn, työn rasitus ja sen vaikutus, työtilojen valaistus ja melutaso sekä työntekijälle kertyvät askeleet ja työturvallisuus. Organisatorisen työergonomian simulointiin liittyen etsittiin työvuoroihin sekä tahtiaikaan liittyviä asetuksia. Näillä tekijöillä on vaikutus reaali maailmassa työn tekemiseen sekä tehokkuuteen, kuten luvussa 3 kerrottiin ja siksi niiden huomioimista tehdassimulointiohjelmassa tutkittiin. Taulukossa 2 koottuna työergonomiaan liittyvät etsityt ominaisuudet. Kognitiiviseen ergonomiaan liittyviä tekijöitä, kuten ihmisen aivoissa tapahtuva tiedon käsittely, ei tehdassimulointiohjelmista etsitty, sillä simulointimallissa olevilla työntekijöillä ei ole älyä, vaan he toimivat kuten heille on asetettu. Tästä syystä ainakaan tämän hetken tehdassimulointiohjelmassa ei kognitiivista ergonomiaa pystytä juuri ottamaan huomioon ja alue rajattiin työn ulkopuolelle.

Taulukko 2. Työergonomiaan liittyvät etsityt ominaisuudet.

Etsitty ominaisuus
Työtehtävien monipuolisuuden mallintaminen
Työtasojen korkeuden säätö ja sen seuraukset
Työn rasittavuus ja sen mittarit sekä seuraukset
Valaistus
Melutaso
Työntekijälle kertyvät askeleet
Työturvallisuus
Työvuorot
Tahtiaika

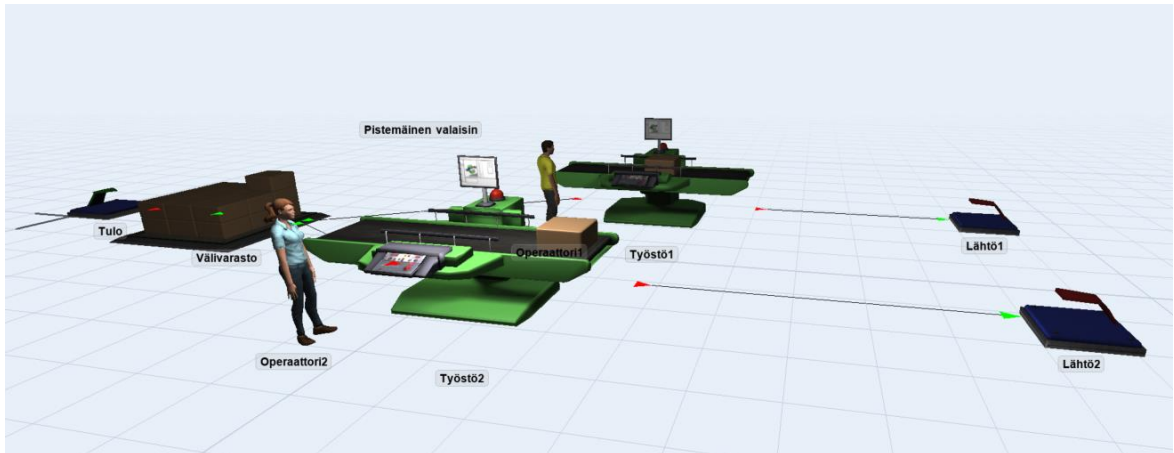
Plant Simulationissa ei juurikaan ole toimintoja työergonomian simulointiin, mutta Siemens Tecnomatixilla on muita ohjelmia, joissa ihmistä pystyy simuloimaan tarkemmin, kuten Process Simulate Human (Siemens 2020). Plant Simulationissa on kuitenkin mahdollista saada selville työntekijän kävelemä matka simulointiajan aikana ja simuloinnin jälkeen voi käytettyjä reittejä tarkastella piirryneiden viivojen avulla. Käveltyjen reittien tarkastelu piirryneiden viivojen avulla voi esimerkiksi auttaa työergonomian suunnittelussa. Myös Visual Componentsin ohjelmassa selviää työntekijän kävelemä matka simulointiajan aikana.

Jokaisessa ohjelmassa työntekijöiden pituutta sekä toisaalta myös työtasojen korkeutta pystyy säätämään, mutta se ei vaikuta työskentelyyn. Vaikka työtaso olisi liian korkea

työntekijälle, työntekijä tekee työn samalla tavalla kuin sopivan korkuisella tasolla. Myöskään mitään työntekijöiden kokemaa räsitystä ei saada selville.

Plant Simulationissa työntekijälle pystyy asettamaan tehokkuuden (engl. efficiency). Kun tehokkuus on 100 %, menee työntekijällä työtehtäviin se aika, joka on ennalta määritetty. Tehokkuutta pystyy koodin avulla ohjaamaan esimerkiksi ajan funktiona laskevaksi, jolloin se voisi kuvata työn aiheuttamaa väsymistä, räsittymistä tai kyllästymistä yksitoikkoiseen työtehtävään, jonka seurauksena työntekijän tehokkuus laskee. On myös mahdollista ohjata koodin avulla työaseman toimintahäiriöt lisääntymään ajan funktiona, mikä voisi edellisen lisäksi myös kuvata tilannetta, jossa työntekijä pitkästyy yksitoikkoisessa työtehtävässä, jolloin keskittyminen häiriintyy ja virheet lisääntyvät. Toivosen (2020) mukaan yksipuolisessa työssä on tärkeää vaihdella työtehtäviä säännöllisin väliajoin fyysisen räsituksen vähentämiseksi, mutta myös kyllästymisen tunteen välttämiseksi. Jos käytössä on työtehtävien kierto, voi koodiin lisätä myös sen, että tietyn ajan välein, kun työtehtävä muuttuu, nousee tehokkuus jälleen ennalleen (Nylund 2021b). Tehokkuutta voi ohjata kasvamaan myös työtehtävän toistojen funktiona, jolloin se voisi kuvata työvaiheen oppimista, jonka seurauksena työntekijä on joka kerta nopeampi tekemään tietyn työvaiheen (Nylund 2021a).

FlexSim oli ainoa tutkittavista ohjelmista, jossa on mahdollisuus säätää valaistusta asettamalla malliin erilaisia valonlähteitä: pistemäinen valo, laajempi valo ja suora valo, joka käyttäytyy auringon lailla. Ohjelmassa on oletusvalaistus, ellei valoja lisätä malliin. Jos taas valaisimia lisätään malliin, vain lisätyt valaisimet valaisevat. Valaisimien intensiteettiä, sädettä ja paikkaa pystyy säätämään. Mallista näkee visuaalisesti, kuinka valaistus vaikuttaa. Kuvassa 3 on esimerkki siitä, kun työstö2-aseman päällä on pistemäinen valo, mutta muita valaisimia ei ole käytössä. Työstö2-asema on siis hyvin valaistu, mutta mallin muut kohteet ovat pimeitä. Kuitenkaan simulointimallissa olevien työntekijöiden työntekoon ei vaikuta valaistuksen taso. He eivät esimerkiksi työskentele hitaammin, jos valaistus on heikko, kuten kuvan 3 työstö1-asemalla.



**Kuva 3.** FlexSimissä pistemäisen valaistuksen vaikutus työstö2-työpisteellä

Visual Componentsin ohjelmassa pystyy työntekijöille määrittämään sykkeen eri työvaiheisiin kuten kuorman nostoon ja liikkumiseen työpisteeltä toiselle. Visual Componentsin ohjelmassa voi itse rakentaa raportointinäkymän (engl. dashboard), johon saa valita haluamansa parametrit seurattavaksi. Jos syke on määritetty työntekijälle, voi raportointinäkymän yhdeksi parametriksi laittaa sykkeen, jolloin simulaation aikana raportointinäkymän piiritys työntekijän syke ajan funktiona. Samaan tapaan voi raportointinäkymästä seurata esimerkiksi työntekijälle kertyneitä askeleita ja hänen kävelemäänsä matkaa.

Visual Componentsin ohjelmassa on suuri valikoima olemassa olevia robotteja, joita malliin voi lisätä. Työturvallisuuteen liittyen törmäyksen robotin ja ihmisen tai muun komponentin kanssa pystyy estämään asetuksia muuttamalla. Malliin saa myös lisättyä valoverhoja tai muita turvallisuuteen liittyviä lattiamerkintöjä ja sensoreita, joihin koskeminen saa robotin tai muun laitteen pysähtymään.

Organisatorista työergonomiaa kuvaava ominaisuus, joka löytyy sekä FlexSimistä että Plant Simulationista on työvuorojen ja niiden sisältämien taukojen asettaminen. Visual Componentsin ohjelmasta ei kyseistä toimintoa etsinnöistä huolimatta löytynyt. Kussakin ohjelmassa on mahdollista määrittää tahtiaika, eli esimerkiksi kappaletavaratuotannossa se, kuinka usein malliin tulee uusi kappale työstettäväksi.

## 5. TULOSTEN ANALYYSINTI

Tehdassimulointi perustuu tapahtumapohjaiseen simulointiin ja sen avulla voidaan ratkaista tuotannon ongelmia, suunnitella tuotantolaitoksia tai niiden osia sekä optimoida tuotannon eri osa-alueita. Tehdassimuloinnin hyviä puolia on se, että eri vaihtoehtoja ja skenaarioita pystytään testaamaan häiritsemättä reaali maailman prosessia tai tekemättä isoja muutoksia ennen kuin ne on testattu. Tämä työ käsitteli kuitenkin tehdassimuloinnin periaatteiden ja käytön lisäksi sitä, kuinka tarkasti juuri ihmisen toimintaa osana laajempaa tuotannon mittakaavaa voidaan simuloida.

Eri tehdassimulointiohjelmiä vertaillen huomattiin, että usein tämänlaisissa tuotantoa simuloivissa tehdassimulointiohjelmissä ihmistä ja ihmisen käyttäytymistä ei ole mahdollista simuloida niin monipuolisesti kuin todellisuudessa ihminen käyttäytyy. Erikseen on olemassa sellaisia simulointiohjelmiä, joissa taas keskitytään pelkkään ihmisen simulointiin, kuten Siemensin Tecnomatix-portfolioon kuuluva Process Simulate Human (Siemens 2020). Tämä on siinä mielessä ymmärrettävää, että tehtaassa tuotanto on huomattavasti ylempää tasoa kuin yksittäisen työntekijän toiminta, joten tuotantoa simuloivissa ohjelmissä keskitytään laajemman mittakaavan simulointiin, eikä mennä niin yksityiskohtaiselle tasolle. Kuten Baines et al. (2004) mainitsivat, voisi näiden näkökulmien yhdistäminen samoihin ohjelmiin kuitenkin auttaa esimerkiksi realistisemmän tuloksen saamisessa sellaisista tuotantoketjuista, joissa ihmisellä on selkeä rooli. Toisaalta sellaisten simulointien kannalta, joissa ihmisen tarkemmalla simuloinnilla ei ole merkitystä, voi sen ominaisuuden lisääminen kuormittaa ohjelmaa turhaan ilman lisähyötyä.

Kaikissa tässä työssä tutkituissa tehdassimulointiohjelmissä oli mahdollista syöttää malliin joitain ihmisen ominaisuuksia ja ergonomiaan liittyviä tekijöitä, kuten kävelynopeus, tasojen korkeudet ja ihmisen koko. Näistä esimerkiksi kävelynopeus on sellainen parametri, joka suoraan vaikuttaa tuotannollisiin tuloksiin kuten valmistuvien tuotteiden määrään, sillä jos työntekijän kävelynopeus on rajoittava tekijä kappaleiden valmistumisnopeudessa, näkyy kävelynopeuden vaikutus valmistuvien tuotteiden määrässä. Mielestäni Plant Simulationin työtehokkuus on hyvä ja monipuolinen parametri, kuten aiemmassa luvussakin kerrottiin. Kuitenkaan yhdestäkään näistä ohjelmista ei saada juuri mitään tuloksia tai palautetta ihmiseen liittyen. Esimerkiksi ihmisen kehoon kohdistuvia rasituksia ei saada selville, kun tehdään toistuvasti jokin nosto. Tai edellistä laajempi näkökulma: Jos simuloitu ajanjakso on ollut todella kiireinen ja vaatinut työnteki-

jöiltä jatkuvaa ponnistelua ja lähes tauotonta työskentelyä, voisi reaali maailmassa työntekijät olla väsyneitä ja stressaantuneita tämän urakan jälkeen. Simulointimalli ei kuitenkaan anna sellaista palautetta, että työntekijät ovat normaalia kuormittuneempia ja heidän suorituskykynsä on esimerkiksi laskenut tietyksi ajaksi raskaan kuormituksen seurauksena. Esimerkiksi Plant Simulationissa pystyy koodin avulla säätämään työtehokkuuden laskemaan ajan funktiona, eli tehokkuus saadaan halutessa muuttumaan, mutta mallissa ei mikään tekijä siihen automaattisesti vaikuta.

Fyysisen työergonomian mallinnukseen tutkituissa tehdassimulointiohjelmissa ei ollut juuri työkaluja. Kaikissa ohjelmissa tasojen korkeuksien säätö oli mahdollista, mutta työtasot ja laitteiden sijoittelu ei vaikuttanut työntekijöiden työntekoon. Kuitenkin työntekijän kävelemä matka saatiin selville, joten tehtaan ja työpisteiden pohjapiirustusta pystyisi sen ominaisuuden näkökulmasta optimoimaan. Flexsim oli ainoa ohjelma, jossa valaistuksen säätö on mahdollista, sekään ei tosin vaikuta simulointimalliin muuten kuin visuaalisesti. Valaistuksen lisäksi lämpötila vaikuttaa työskentelyyn. Sitä ei suoranaisesti simulointimalliin voi asettaa, mutta esimerkiksi liian suuri lämpötila tai heikko valaistus voi vaikuttaa työtehokkuuteen ja työtehokkuutta pystyy muuttamaan. Visual Componentsin ohjelmassa on mahdollista määrittää jokaiselle työntekijälle erikseen kävelynopeus ja eri toimintoihin kuluva aika, jolloin saadaan mallinnettua eri työntekijöiden välisiä eroja voimantuotossa sekä muissa fyysisissä ominaisuuksissa.

Kognitiivisen ergonomian huomiointia ei tehdassimulointiohjelmissa tutkittu, sillä sen simulointi on melko haastavaa. Huono kognitiivinen ergonomia saattaisi vaikuttaa ihmisen työskentelyyn esimerkiksi alentaen keskittymiskykyä ja työtehokkuutta. Jos tiedetään ennestään, kuinka se simuloitavassa tilanteessa vaikuttaa, on sen vaikutukset mahdollista ottaa muissa parametreissa huomioon. Organisatorinen työergonomia tulee huomioitua simulointimallissa työvuorojen ja tahtiajan avulla. Lopputulemana voitaisiin sanoa, ettei työergonomia ole ainakaan tässä työssä tutkituissa tehdassimulointiohjelmissa kovin monipuolisesti otettu huomioon.

Plant Simulationissa työntekijät voidaan jakaa ryhmiin ja eri ryhmille voidaan määritellä eri työvaiheet, jolloin on mahdollista mallintaa työntekijöiden ja työntekijäryhmien välisiä eroja taidoissa. Ihmisen kyvykkyyteen voisi ajatella liittyvän osaamisen lisäksi halun ja motivaation käyttää osaamistaan, mutta sen simulointi on hieman haastavampaa. Toki motivaation puutteen voi, kuten muutaman aiemminkin mainitun asian, liittää jälleen johonkin toiseen parametriin, esimerkiksi työtehokkuuteen, jos näiden vaikutussuhde tiedetään.

Ihmiseen liittyvät tekijät ovat ennemminkin lähtötietoja kuin tuloksia simuloinnista. Malliin pystytään syöttämään ihmisestä jonkun verran tietoja, jotka vaikuttavat systeemiin ja tuotantoon, mutta mallista ei saada ulos tietoja, miten systeemi ja tuotanto vaikuttavat työntekijään ja miten se edelleen vaikuttaa takaisin tuotantoon. Lisäksi kuten aiemmin mainittu, monet ympäristötekijät ja esimerkiksi ihmisen motivaatio ovat sellaisia työntekoon vaikuttavia tekijöitä, joita ei suoraan saa malliin lisättyä lähtötiedoiksi, mutta niiden vaikutuksen muihin parametreihin kuten työtehokkuuteen voi laskea ja ottaa huomioon sen kautta. Tällaisissa saa kuitenkin olla varovainen, jotta malli pysyy oikeana ja seuraukset ovat samoja kuin reaali maailmassa.

Mainitut asiat ja puutteet eivät ole kaikkiin simulointiprojekteihin tärkeitä tekijöitä, vaan aina tulee miettiä, mitkä tekijät vaikuttavat ja ovat tärkeitä tietyn yksittäisen simulointiprojektin kannalta. Simulointiprojektissa määritetään, mihin ongelmaan tarvitaan vastaus ja mitä tuloksia simuloinnista halutaan. Tämän pohjalta rakennetaan malli, joka vastaa juuri näihin kysymyksiin. On turhaa rakentaa malli, joka on liian laaja tai yksityiskohtainen tarvittaviin tuloksiin nähden. Vähintäänkin on aina arvioitava mallin luotettavuus ja oikeellisuus, kun erilaisia ihmisiin liittyviä ominaisuuksia mallinnetaan ja malliin asetetaan, jotta malli vastaa oikean maailman tilannetta.

Näkisin kuitenkin, että työolosuhteet ja ihmisen motivaatio ovat sen verran merkittäviä tekijöitä, että varsinkin jos simuloitava tilanne on sellainen, että siinä ihmisen tekemällä työllä on iso rooli, olisi näiden asioiden huomioon ottaminen tehdassimulointimallissa tärkeää tulosten kannalta. Fyysisestä ergonomiasta taas esimerkiksi työtasojen korkeus on kyllä tärkeä asia työn tekemisen kannalta, mutta ei ehkä sellainen tekijä, joka kannattaa ottaa mukaan juuri tehdassimulointiin. Toki, jos suunnitellaan pienessä mittakaavassa yksittäistä työpistettä, ovat oikeassa mittakaavassa olevat kalusteet edellytys suunnittelulle. Kokonaisen tuotannon suunnitteluun niillä ei kuitenkaan ole merkitystä, vaan työergonomiia voidaan niiden osalta suunnitella erikseen. Tehdassimulointiohjelmista ei työntekijän kävelemää matkaa lukuun ottamatta saada ulostulona sellaisia tuloksia, joita pystyttäisiin hyödyntämään työergonomian suunnittelussa.

Eri tehdassimulointiohjelmissa ihmisen käyttäytymistä on mahdollista simuloida eri tavoin, vaikkakin perusominaisuudet, kuten kävelynopeus ja ihmisen mitat asetetaan kaikissa melko samalla tavalla. Vaikka varsinaisesti simulointimalli ei jotakin ihmisen ominaisuutta ottaisiikaan huomioon, esimerkiksi työmotivaatiota, voi olla mahdollista ottaa se huomioon muissa parametreissa, kuten työtehokkuus, kävelynopeus tai virheellisten kappaleiden määrä. Myös itse kirjoitetun koodin avulla on mahdollista lisätä ominaisuuksia simulaatioon. Ihminen rinnastetaan tehdassimulointiohjelmissa koneisiin, mikä siinä



mielessä on ymmärrettävää, että kummatkin ovat tuotannon resursseja, mutta ihmisessä on todellisuudessa konetta enemmän ulottuvuuksia ja vaihtelua itseensä sekä muihin ihmisiin verrattuna, ettei koneisiin rinnastaminen välttämättä anna todellista kuvaa ihmisen suorituskyvystä. Tulosten mukaan ihmistä ei siis ole ainakaan vielä mahdollista simuloida kovin monipuolisesti tai oikeaa maailmaa vastaavasti tehdassimulointiohjelmissä.

## 6. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tutkia, miten työergonomiaa ja ihmisen kyvykkyyksiä sekä ominaisuuksia pystytään simuloimaan tehdassimulointiohjelmissa, jotka eivät ole keskittyneet ainoastaan ihmisen simulointiin vaan yleisemmällä tasolla tuotannon simulointiin. Työssä vastattiin lisäksi kysymykseen, mitä on tehdassimulointi.

Työn teoriaosa suoritettiin kirjallisuuskatsauksena. Luvussa kaksi esiteltiin tehdassimuloinnin käyttökohteita, toimintaperiaatteita sekä haittoja ja hyötyjä. Teoriaosa jatkui luvussa kolme, jossa kerrottiin työergonomiasta, hyvästä työpisteestä ja työhön vaikuttavista ympäristötekijöistä. Tapaustutkimuksessa etsittiin kolmesta tutkittavasta tehdassimulointiohjelmaista työergonomiaan ja ihmisen kyvykkyyksiin sekä ominaisuuksiin liittyviä simulointimahdollisuuksia. Tuloksia käsiteltiin luvussa neljä. Työ rajattiin koskemaan vain tehdassimulointia sekä kolmea tehdassimulointiohjelmaa, jotka eivät ole tarkoitettu ihmisen simulointiin vaan laajemmin tuotannon simulointiin, jossa ihminen on vain resurssi. Näistä tehdassimulointiohjelmissa tutkittiin vain työergonomiaan sekä ihmisen ominaisuuksiin ja kyvykkyyksiin liittyviä ominaisuuksia.

Työssä selvitettiin, että tehdassimulointi on teollisuuden digitaalinen työkalu, jota voidaan käyttää apuna tehtaan tai tuotantolinjan suunnitteluun sekä tuotannon eri osien optimointiin. Lisäksi työn tuloksena saatiin, että tehdassimulointiohjelmissa simulointimalliin pystyy ihmiselle antamaan joitakin ominaisuuksia, mutta harvemmin simuloinnista saadaan ulostulona ihmiseen liittyviä tuloksia. Työergonomian parantamiseksi ainoa tieto, joka simulointimallista saadaan tuloksena, oli tutkittavissa ohjelmissa työntekijän kävelemä matka. Työntekijöihin ja työergonomiaan liittyvien asetusten vaikutus näkyy useimmiten siinä, miltä malli näyttää eikä niinkään sen toiminnassa, pois lukien työntekijän kävelyvauhti ja työvaiheisiin kuluva aika, jotka vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti työ saadaan suoritettua. Toisaalta on joitain tekijöitä, kuten työntekijän huono työmotivaatio, joka on mahdollista lisätä malliin esimerkiksi huonona työtehokkuutena, vaikka suoraan motivaatiota ei työntekijälle malliin saa asetettua. Näiden kanssa tulee kuitenkin olla varovainen, jotta simuloidaan oikeasti ilmentyviä vaikutuksia.

Työn rajoitteena on, että tutkittiin vain kolmea tehdassimulointiohjelmaa. Työ ei siis kata kaikkia olemassa olevia tehdassimulointiohjelmiä eikä myöskään kaikkia olemassa olevia simulointiohjelmiä. Kuitenkin tutkituista kolmesta ohjelmasta saatiin melko hyvin kerättyä tietoa ihmisen simuloinnista tehdassimulointiohjelmissa. Tulokset ovat hyvin hyödynnettävissä ainakin sen osalta, kun mietitään, miten aihetta voisi tutkia lisää ja mitä

asioita tehdassimulointiohjelmissä jatkokehittää. Tulokset eivät siis tutkimuksen rajauksesta johtuen ole kaiken kattavia, mutta hyvin realistisia ja suuntaa antavia. Työ osoittaa, että joitakin puutteita on siinä, kuinka monipuolisesti ihmistä voidaan tehdassimulointiohjelmissä simuloida.

Vaikka nykypäivänä uusia koneita ja automaatiota kehitetään jatkuvasti, on ihmisellä edelleen usein oma roolinsa tuotannossa. Tehdassimulointi taas on yksi nykyajan digitaalisista apuvälineistä tuotannosuunnittelua ja -kehitystä varten. Ei ole kuitenkaan juurikaan tutkittu, kuinka realistisesti ihmistä pystytään simuloimaan osana tuotantojärjestelmää. Tällaiselle tutkimukselle oli siis tarvetta. Tulevaisuudessa kannattaisi kehittää tehdassimulointiohjelmiä siten, että ihmisen toiminta saataisiin simulointimalleissa mahdollisimman lähelle todellisuutta ja että simulointimalleihin pystyttäisiin lisäämään tekijöitä, jotka todellisessa maailmassa vaikuttavat työn tekoon.

## LÄHTEET

Baines, T., Mason, S., Siebers, P.O. & Ladbrook, J. (2004). Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simulation Modelling Practice and Theory*. ScienceDirect. Vol. 12(7–8) pp. 515–526. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S1569-190X\(03\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S1569-190X(03)00094-7)

Banks, J. (1998). Steps in a Simulation Study. Teoksessa *Handbook of Simulation - Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. John Wiley & Sons. Saatavissa rajoitetusti: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003Z4282/handbook-simulation-principles/steps-in-simulation-study>

Banks, J. (2003). Discrete event simulation. Elsevier. ScienceDirect. pp. 663–671 Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227240-4/00045-9>

Brailsford, S., Churilov, L., & Dangerfield, B. (2014). Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making. John Wiley & Sons. ProQuest Ebook Central. p. 362. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1666485>

Carson, J. S. (2005). Introduction to modeling and simulation, Winter Simulation Conference, Orlando, FL, USA, December 4-4, 2005. IEEE, pp. 16–23. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/WSC.2005.1574235>

Chung, C.A. (2004). *Simulation modeling handbook: a practical approach*. CRC Press.

FlexSim. (2022a). FlexSim. [Verkkosivu]. Viitattu 18.1.2022. Saatavissa: <https://www.flexsim.com/>

FlexSim. (2022b). Products: FlexSim. [Verkkosivu]. Viitattu 18.1.2022. Saatavissa: <https://www.flexsim.com/flexsim/>

Gołda, G., Kampa, A. & Krenczyk, D. (2019) The Methodology of Modeling and Simulation of Human Resources and Industrial Robots in FlexSim. Teoksessa Pawlewski P., Hoffa-Dabrowska P., Golinska-Dawson P., Werner-Lewandowska K. (toim.), *FlexSim in Academe: Teaching and Research*. EcoProduction. Springer, Cham. pp. 87–99 Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04519-7\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04519-7_7)

Harriott, C. & Adams, J. (2013). Modeling Human Performance for Human-Robot Systems. *Reviews of Human Factors and Ergonomics*. Sagejournals. Vol. 9(1). pp. 94–130. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/1557234X13501471>

Jyväskylän yliopisto (2015) Tapaustutkimus. [Verkkosivu]. Viitattu 12.1.2022. Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/tapaustutkimus>

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T. & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Wirtschaftsinf.* SpringerLink. Vol. 56(4). pp. 239–242. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

Launis, M. (2011a). Ergonomisen suunnittelun ja kehittämisen menetelmiä. Teoksessa Launis, M. & Lehtelä, J. (toim.), *Ergonomia*. Työterveyslaitos. Julkari. s. 354–385. Saatavissa: <https://www.julkari.fi/handle/10024/136841>

Launis, M. (2011b). Ihmisen mitat. Teoksessa Launis, M. & Lehtelä, J. (toim.), *Ergonomia*. Työterveyslaitos. Julkari. s. 45–68. Saatavissa: <https://www.julkari.fi/handle/10024/136841>

Lehtelä, J. (2011). Ergonomiaa koskevia säädöksiä ja standardeja. Teoksessa Launis, M. & Lehtelä, J. (toim.), *Ergonomia*. Työterveyslaitos. Julkari. s. 386–397. Saatavissa: <https://www.julkari.fi/handle/10024/136841>

Lehtelä, J. & Launis, M. (2011). Valaistus, ääniympäristö ja lämpöolot. Teoksessa Launis, M. & Lehtelä, J. (toim.), *Ergonomia*. Työterveyslaitos. Julkari. s. 266–288. Saatavissa: <https://www.julkari.fi/handle/10024/136841>

Lind, S., Krassi, B., Viitaniemi J., Kiviranta S., Heilala J. & Berlin, C. (2008). Linking Ergonomics Simulation to Production Process Development. Winter Simulation Conference, Miami, FL, USA, December 7–10, 2008. IEEE, pp. 1968–1973. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/WSC.2008.4736290>

Louhevaara, V. & Launis, M. (2011). Voimat, liikkeet ja asennot. Teoksessa Launis, M. & Lehtelä, J. (toim.), *Ergonomia*. Työterveyslaitos. Julkari. s. 69–86. Saatavissa: <https://www.julkari.fi/handle/10024/136841>

Nylund, H. (2021a). Pieni tehdas. Tuotantojärjestelmien suunnittelu. Tampereen yliopisto. Viitattu: 4.12.2021 Tampere. Saatavissa rajoitetusti: <https://moodle.tuni.fi/mod/folder/view.php?id=1222405>

Nylund, H. (2021b). Työtehokkuussimulointi. Kestävä tuotanto. [Tehdassimulointimalli]. Tampereen yliopisto. Viitattu: 19.11.2021. Tampere. Saatavissa rajoitetusti: <https://moodle.tuni.fi/mod/folder/view.php?id=1089353>

Plant Simulation. Factory 51. [Tietokoneohjelma]. Viitattu: 1.12.2021.

Qiao, D. & Wang, Y. (2021). A Review of the Application of Discrete Event Simulation in Manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series* Vol. 1802(2), IOP Publishing. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1802/2/022066>

Seppälä, P. (2011). Vireystila, stressi ja monotonia. Teoksessa Launis, M. & Lehtelä, J. (toim.), *Ergonomia*. Työterveyslaitos. Julkari. s. 103–109. Saatavissa: <https://www.julkari.fi/handle/10024/136841>

SFS-EN ISO 7250-1:2017. (2017). Basic human body measurements for technological design. Part 1: Body measurement definitions and landmarks. Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki. 55 p.

SFS Online: hakusana *koneturvallisuus*. (2021). [Online-tietokanta]. Suomen standardoimisliitto SFS ry, Helsinki. Viitattu 29.11.2021. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/hakutulos.html.stx>

Siemens. (2020). Process Simulate Human. [Verkkosivu]. Viitattu 14.12.2021 Saatavissa: <https://www.dex.siemens.com/plm/tecnomatix/process-simulate-human>

Siemens. (2022a). Products: Plant Simulation & Throughput Optimization. [Verkkosivu]. Viitattu 18.1.2022. Saatavissa: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/manufacturing-planning/plant-simulation-throughput-optimization.html>

Siemens. (2022b). Products: Tecnomatix. [Verkkosivu]. Viitattu 18.1.2022. Saatavissa: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/tecnomatix/>

Skoogh, A. & Johansson, B. (2007). Time-consumption analysis of input data activities in discrete event simulation projects. The Swedish Production Symposium, August 2007. ResearchGate. Vol. 1. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/235719405\\_TIME-CONSUMPTION\\_ANALYSIS\\_OF\\_INPUT\\_DATA\\_ACTIVITIES\\_IN\\_DISCRETE\\_EVENT\\_SIMULATION\\_PROJECTS](https://www.researchgate.net/publication/235719405_TIME-CONSUMPTION_ANALYSIS_OF_INPUT_DATA_ACTIVITIES_IN_DISCRETE_EVENT_SIMULATION_PROJECTS)

Skoogh, A. & Johansson, B. (2008). A methodology for input data management in discrete event simulation projects. Winter Simulation Conference, Miami, FL, USA, December 7–10, 2008. ResearchGate. pp. 1727–1735. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/WSC.2008.4736259>

Sun, W., Wu, J., Xiao, G. & Jin, Z. (2021). Research on Selection of Commercial Industrial Simulation Software Oriented to Virtual Commissioning. 4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Materials, Intelligent Manufacturing and Automation, Hangzhou, China, April 2-4, 2021. Journal of physics: Conference series. IOP Publishing Ltd. Vol. 1906. pp. 1–7. Saatavissa: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1906/1/012052>

Toivonen, R. (2020). T U R V A L L I N E N J A T U O T T A V A T U O T A N T O Y M P Ä R I S T Ö T E O L L I S U U D E S S A – ergonomiaa suunnittelemalla. Työturvallisuuskeskus, teollisuusryhmä. Viitattu 30.9.2021. Saatavissa: [https://ttk.fi/oppaat\\_ja\\_ohjeet/ladattavat\\_julkaisut/turvallinen\\_ja\\_tuottava\\_tuotantoymparisto\\_teollisuudessa\\_-\\_ergonomiaa\\_suunnittelemalla#7e80d579](https://ttk.fi/oppaat_ja_ohjeet/ladattavat_julkaisut/turvallinen_ja_tuottava_tuotantoymparisto_teollisuudessa_-_ergonomiaa_suunnittelemalla#7e80d579)

Tuomi, S., Kunnela, A. & Latvala, E. n.d. Opinnäytetyön ohjaajan käsikirja. Jamk. [Verkkosivu]. Viitattu 12.1.2022. Saatavissa: <https://oppimateriaalit.jamk.fi/yamk-kasikirja/kirjallisuuskatsaukset/>

Visual Components. (2022). Products. [Verkkosivu]. Viitattu 18.1.2022. Saatavissa: <https://www.visualcomponents.com/products/>

Visual Components Premium. Indexing label layout. [Tietokoneohjelma]. Viitattu: 1.12.2021

Zhang, Z., Wang, X., Wang, X., Cui, F. & Cheng, H. (2018). A simulation-based approach for plant layout design and production planning. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. SpringerLink. Vol. 10. pp. 1217–1230. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0687-5>