

Mika Kuivajärvi

KOKOONPANOPROSESSIN KEHITTÄMINEN KOHDEYRITYKSEN SÄHKÖOSASTOLLA

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Professori Minna Lanz
Tarkastaja: Projektipäällikkö Jyrki Latokartano
Marraskuu 2024

TIIVISTELMÄ

Mika Kuivajärvi: Kokoonpanoprosessin kehittäminen kohdeyrityksen sähköosastolla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Kone- ja tuotantotekniikka
Marraskuu 2024

Tämän diplomityön kohdeyritys, Dynaset Oy, on maailman johtava hydraulisten generaattoreiden, korkeapainepumppujen ja kompressoreiden valmistaja. Nousujohteisen kysynnän kasvun myötä yritys haluaa tehostaa kokoonpanoprosessejaan siirtymällä linjamaiseen kokoonpanoon. Tämän työn tarkoituksena on kehittää sähköosaston kokoonpanoprosessia suunnitteleamalla automaatiota tukeva kokoonpanolinja. Linjalla on tarkoituksena kokoonpanna sähköosaston generaattorit, joiden massa on enintään 70 kg. Kokoonpanolinjan lisäksi työn tavoitteena on kehittää yrityksen suurmenekkisen generaattorin kokoonpantavuutta DFA-näkökulmasta (engl. Design for Assembly). Tavoitteena on, että 80 % kyseisen generaattorin kokoonpanovaiheista on toteutettavissa robotilla.

Työhön sisältyy kirjallisuuskatsaus, jossa käsitellään linjan suunnittelussa ja generaattorin rakenteen kehittämisessä hyödynnettävää teoriaa. Teoriaosuudessa kerrotaan työn kannalta oleellinen tieto lean-periaatteista, kokoonpanolinjoista ja niiden tasapainotuksesta, työntutkimuksesta sekä kokoonpanon kehittämisestä DFA-menetelmin. Teoriaosuuden jälkeen kuvatussa työn kokeellisessa osiossa kuvataan linjalle tuleville tuotteille toteutetut analyysit ja työntutkimukset. Lisäksi generaattorille, jonka kokoonpanovaiheita aletaan robotisoimaan, suoritetaan tarkemmat analyysit.

Suoritettujen tutkimusten tuloksena sähköosastolle saatiin tasapainotettu kokoonpanolinja. Alustavan seurannan perusteella linjaratkaisun myötä saavutettiin tuotteiden tuotannon läpimenoaikoihin keskimäärin jopa 78 % parannus. Käyttöön otettaessa generaattorin, jonka kokoonpanoa on tarkoitus automatisoida, rakennemuutokset, saadaan kokoonpanossa tarvittavien osien lukumäärä 50 % nykyisestä. Tällöin 73 % kokoonpanon vaiheista voitaisiin toteuttaa robotilla.

Avainsanat: kokoonpanolinja, kokoonpanolinjan tasapainotus, työntutkimus, DFA, lean

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Mika Kuivajärvi: Development of the assembly process in the electrical department of the target company
Master's thesis
Tampere University
Mechanical and Production Engineering
November 2024

The target company of this thesis, Dynaset Oy, is the world's leading manufacturer of hydraulic generators, high-pressure pumps and compressors. Due to increasing demand, the company aims to improve its assembly processes by transitioning to a line-based assembly. The purpose of this work is to make the assembly process more effective in the electrical department by designing an assembly line that supports automation. The purpose of the line is to assemble the electrical department's generators with a maximum mass of 70 kg. In addition to the assembly line, the objective is to improve the assemblability of one of the company's high-demand generators from a DFA (Design for Assembly) perspective. The goal is that 80% of the assembly steps of this generator can be implemented with a robot.

The work includes a literature review that discusses the theory used in the design of the assembly line and the development of the generator structure. The theoretical part covers relevant information about lean principles, assembly lines and their balancing, work study and assembly development using DFA methods. After the theoretical part, the experimental part of the work describes the analyses and work studies for the products coming to the assembly line. In addition, more detailed analyses are performed for the generator, whose assembly steps are starting to be automated.

As a result of the research, a balanced assembly line was developed for the electrical department. Based on preliminary monitoring with the line solution, an average improvement of up to 78 % was achieved in products production lead times. When the structural plans for the generator, whose assembly is to be automated, are implemented, the number of parts required in the assembly will be 50 % of the current one. In this case 73 % of the assembly steps would be feasible by robot.

Keywords: assembly line, assembly line balancing, work study, DFA, lean

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Haluan kiittää kohdeyritystä Dynaset Oy saamastani diplomityön aiheesta: sähköosaston kokoonpanoprosessin tehostamisesta. Olen kiitollinen saamastani vastuusta ja haasteista tähän varsin merkittävään projektiin liittyen. Erityiskiitokset yrityksen puolesta minua auttaneelle Teemu Jamrozinskillle aktiivisesta ohjauksesta ja hyvistä neuvoista läpi koko työn ajan. Kiitokset kuuluvat myös sähköosaston työnjohtajalle Ville Hautakoskelle yhteistyöstä ja yhteisistä palaverituokioista. Kiitos kaikille dynasetilaisille, jotka edesauttoivat projektin onnistumisessa. Erikseen haluan mainita kaikki tuotteistuksen ja tuotannon tuen työntekijät, suuret kiitokset inspiroivasta ja huumoripitoisesta työotteesta. He ymmärtävät mitä tarkoitan.

Tämän työn tuloksena syntyneen linjan suunnittelussa tehtiin yhteistyötä linjan toimittaneen yrityksen, IT-Linen kanssa. Kiitokset IT-Linelta projektiin osallistuneille henkilöille. Heidän ammattitaitonsa teki vaikutuksen. Kiitoksensa ovat ansainneet myös työn ohjaajat yliopistolta, Jyrki Latokartano ja Minna Lanz, heiltä sain nopeasti tukea aina tarvittaessa.

Diplomityö oli antoisa ja työläs projekti, jossa läheisten tuesta oli suurta apua. Haluankin kiittää heitä tsemppaamisesta ja luottamuksesta läpi koko opintojeni ajan.

Akaassa, 13.11.2024

Mika Kuivajärvi

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
1.1 Tutkimusongelma.....	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus	2
1.3 Tutkimusstrategia ja -menetelmät.....	3
1.4 Työn rakenne	4
2. KIRJALLISUUSKATSAUS.....	6
2.1 Lean	6
2.1.1 Hukka.....	7
2.1.2 Lean-työkaluja ja -käsitteitä	9
2.2 Kokoonpanolinjat	10
2.2.1 Kokoonpanolinjojen jaottelu	11
2.2.2 Kokoonpanolinjan käsitteitä	13
2.2.3 Kokoonpanolinjan suunnittelu	14
2.2.4 Linjan layout ratkaisut	16
2.2.5 Kokoonpanolinjan tasapainotus	18
2.2.6 Kokoonpanolinjan sekvensointi.....	22
2.2.7 Työntutkimus.....	25
2.2.8 Investoinnin takaisinmaksu	26
2.3 Kokoonpanon kehittäminen ja DFX-menetelmät	27
2.3.1 Toiminnallinen analyysi.....	30
2.3.2 Suunnittelutehokkuus.....	31
2.3.3 DFA-indeksi	32
3. TUTKIMUKSEN EMPIIRINEN OSUUS	33
3.1.1 Yritysesittely.....	33
3.1.2 Generaattori- ja magneettigeneraattorimallit.....	33
3.1.3 Kokoonpanoprosessin nykytila	34
3.2 Työntutkimus.....	36
3.2.1 Tuotteiden analysointi	37
3.2.2 Generaattorin X nykyisen rakenteen DFA-analysointi	38
3.2.3 Generaattorin X rakenteen kehitys	39
3.3 Kokoonpanolinjan suunnittelu	40
3.3.1 Kokoonpanolinjan vaiheistus ja tasapainotus	42
3.3.2 Kokoonpanolinjan takaisinmaksuaika	42
4. TULOKSET.....	44
5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITYSEHDOTUKSET.....	47

5.1	Tulosten yleistettävyys.....	47
5.2	Tulosten luotettavuus.....	48
5.3	Työn tutkimuskysymykset.....	49
5.4	Käytetyn aineiston arviointi	49
5.5	Kehitysehdotukset.....	50
LÄHTEET	52

1. JOHDANTO

Yrityksien on pystyttävä tuottamaan yhä laajempia tuotevalikoimia entistä alhaisemmilla kustannuksilla pysyäkseen mukana alati kasvavassa kilpailussa. Tähän vastatakseen on yritysten käytettävä kustannustehokkaita ja joustavia tuotantojärjestelmiä. Tällöin kysymykseen nousevat kokoonpanolinjat, joilla on tärkeä merkitys suurten standardisoitujen hyödykkeiden teollisessa tuotannossa. Viime aikoina kokoonpanolinjoja on alettu hyödyntää yhä enenevässä määrin myös räätälöityjen pienimennekkisten tuotteiden tuotannossa. (Boysen ym., 2007, 2008, 2009)

Työn teettäjäyritys Dynaset Oy haluaa tukea kasvutavoitteitaan tehostamalla kokoonpanoprosesseja. Siitä syntyi tarve tälle tutkimustyölle, jonka tarkoituksena on kehittää sähköosaston kokoonpanoprosessia kokoonpanolinjan käyttöönottamisella. Ennen kokoonpanolinjan käyttöönottoa perehdytään nykyisiin kokoonpanomenetelmiin ja -tapoihin. Kokoonpano pyritään tekemään mahdollisimman helpoksi kokoonpanotyöntekijälle, jolloin automaation lisääminen tulee tulevaisuudessa helpommaksi. Yrityksen suunnitelmana on automatisoida linjalla tapahtuvaa kokoonpanoa, joten suunniteltavan linjan tulee mahdollistaa automaation käyttöönottamisen.

Työhön sisältyy runsaasti tuotteiden analysointia. Analysoinneissa määritetään tuotteiden rakennetta, kokoonpanovaiheita ja työaikoja. Näitä analyyseja ei kuvata yksityiskohtaisesti yrityksen toiveiden mukaisesti.

1.1 Tutkimusongelma

Tämän tutkimustyön taustalla on kohdeyrityksen halu kehittää sähköosastolla kokoonpantavien tuotteiden kokoonpanoprosessia. Prosessia kehitetään sähköosaston siirtyessä uusiin tuotantotiloihin. Kokoonpanoprosessista halutaan entistä systemaattisempi ja tehokkaampi, jota varten suunnitellaan kokoonpanolinja. Linjalle tullaan investoimaan robotiikkaa ja automaatiota. Tarkoituksena on, että robotiikka otetaan mukaan vaiheittain. Ensimmäisenä lähdetään automatisoimaan erään suurmenekkisen generaattorin (generaattori X) kokoonpanoa. Automatisoinnin mahdollistamiseksi, on kyseiseen tuotteeseen tehtävä rakennemuutoksia. Muutosten avulla mahdollistetaan mahdollisimman suuri automaatioaste.

Tutkimuksen viitekehyksenä on kokoonpanoprosessia käsittelevissä asioissa kokoonpanon viitekehys. Keskityttäessä generaattorin X rakenteeseen, lähestytään aihetta DFA-viitekehyksen näkökulmasta. Ongelman kuvauksesta havaitaan, että kyseessä ei ole puhtaasti tieteellinen tutkimus. Ongelmaa lähdetään silti ratkaisemaan tieteellisen tutkimuksen keinoin. Seuraavaksi kuvataan tutkimusongelman tavoitteet ja rajaukset tarkemmin.

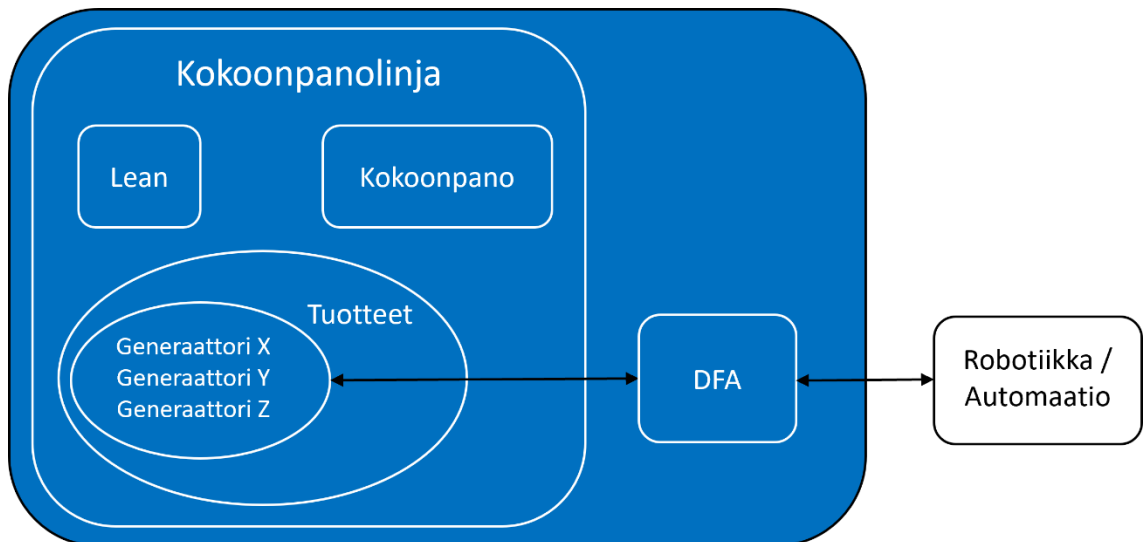
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Tutkimusongelmasta saadaan työlle tavoitteet. Tarkoituksena on suunnitella kohdeyrityksen uusiin tuotantotiloihin kokoonpanolinja. Linjalla tulee pystyä kokoonpanemaan yrityksen sähköosaston tuotteita, joiden massa on enintään 70 kg. Linjan suunnittelussa tulee huomioida robotiikan ja automatisaation mahdollistaminen. Tämä on tärkeää kohdeyrityksen kasvun kannalta. Robotiikasta ja automaatiosta johtuvan tuottavuuden kasvun arvioidaan alimmillaankin olevan n. 2,6 % vuotuista tuottavuuden nousua (Ventä ym., 2018, s. 28).

Toisena tavoitteena on linjalla tapahtuvien työvaiheiden vaiheistuksien tasapainottaminen. Lam ym. (2016) mainitsevat linjan tasapainotuksen olevan tarpeellista lähes jokaisella kokoonpanolinjalla. Tasapainotuksen tarkoituksena on Stephensin (2019, s. 78) mukaan saada työkuorma mahdollisimman tasaiseksi työntekijöiden kesken. Onnistuneen tasapainotuksen myötä saavutetaan selkeitä kustannussäästöjä.

Robotiikasta ja automaatiosta saadaan työn kolmas tavoite. Tavoitteena on kehittää generaattorin X kokoonpantavuutta. Kyseiseen tuotteeseen suunniteltavia muutoksia voidaan soveltaa myös kahteen muuhun malliin (generaattori Y ja generaattori Z), joissa rakenne on samankaltainen. Rakennetta kehitetään kokoonpantavuuden näkökulmasta, osien valmistuskustannukset huomioiden. Tarkoituksena on, että generaattorin X kokoonpanon vaiheista 80 % pystytään toteuttamaan automaatiota hyödyntäen.

Työn tutkimusongelmaa ratkaistaessa keskitytään lean-menetelmiin, kokoonpanolinjojen teoriaan ja käsitteisiin sekä DFA-periaatteisiin. Näiden pohjalta lähdetään suunnittelemaan kokoonpanolinjaa ja kehittämään generaattorin X rakennetta. Työn ulkopuolelle jätetään robotiikka ja automaatiikka, silti ne pyritään mahdollisimman hyvin huomioimaan työn aikana. Kuva 1 on havainnollistava kuva työn rajauksesta.



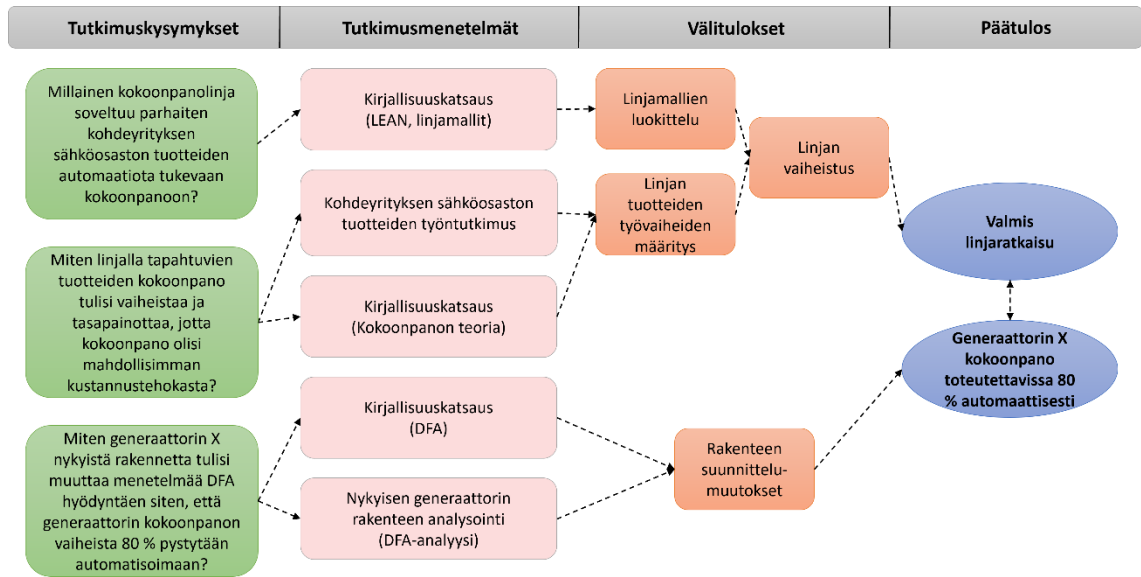
Kuva 1. Työn rajaus.

1.3 Tutkimusstrategia ja -menetelmät

Työn kolme tavoitetta ovat uuden kokoonpanolinjan suunnittelu, linjan vaiheistuksen tasapainotus sekä generaattorin X rakenteen kehittäminen. Näiden tavoitteiden pohjalta saadaan kolme tutkimuskysymystä, joihin työssä pyritään vastaamaan. Nämä tutkimuskysymykset ovat:

1. Millainen kokoonpanolinja soveltuu parhaiten kohdeyrityksen sähköosaston tuotteiden automaatiota tukevaan kokoonpanoon?
2. Miten linjalla tapahtuvien tuotteiden kokoonpano tulisi vaiheistaa ja tasapainottaa, jotta kokoonpano olisi mahdollisimman kustannustehokasta?
3. Miten generaattorin X nykyistä rakennetta tulisi muuttaa menetelmää DFA hyödyntäen siten, että generaattorin kokoonpanon vaiheista 80 % pystytään automatisoimaan?

Kuva 2 esittää työssä käytetyt menetelmät ja reitit, joilla tutkimuskysymyksiin ja koko tutkimusongelmaan selvitetään ratkaisut.



Kuva 2. Tutkimusstrategian kuvaus.

Tutkimus toteutetaan pääosin kvalitatiivisena tutkimuksena, mutta mukaan otetaan myös kvantitatiivista tutkimusta. Laaksonen (1998, s. 164) on todennut, että kummallakin menetelmäsuuntauksella on reviirinsä, mutta elämän tosiongelmat vaativat molempien hyödyntämistä.

1.4 Työn rakenne

Johdanto-osion aihepiirin esittelyn jälkeen alkaa luvun 2 kirjallisuuskatsaus. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään lean-filosofian mukaisiin menetelmiin tehokkuuden lisäämiseksi. Tarkoituksena on hahmottaa toimintatapoja, joita voidaan hyödyntää linjamallisessa kokoonpanossa. Leanin selvityksen jälkeen käsitellään kokoonpanolinjoja. Osiossa kuvataan kokoonpanolinjojen taustaa, käsitteitä, suunnittelua, tasapainotusta ja sekvensointia. Kokoonpanolinjoista siirrytään työntutkimuksen teoriaan. Työntutkimus on merkittävässä roolissa linjaa suunniteltaessa ja tasapainotettaessa. Lisäksi esitellään tietyin yksinkertaistuksin investoinnin takaisinmaksun laskeminen. Teoriaosuuden lopussa syvennytään kokoonpanon kehittämiseen DFX-menetelmien (design for X) näkökulmasta. Osiossa esitellään toiminnallisen analyysin suorittaminen sekä suunnittelutehokkuuden ja DFA-indeksin laskeminen.

Taustatietojen selvityksestä päästään työn empiiriseen, eli kokeelliseen osioon. Luvun 3 empiirisessä tutkimuksessa esitellään aluksi kohdeyritys ja sähköosaston kokoonpanoprosessin nykytila. Tämän jälkeen esitetään linjan suunnittelun ja generaattorin X rakenteen kehityksen taustalla vaikuttanut työntutkimus.

Yrityssalaisuuksien vuoksi tuoteanalyseja ei kuvata tarkemmin. Tarkoituksena on hahmottaa, millaisia menetelmiä käytettiin. Empiirisen osuuden lopussa esitellään generaattorin X uutta rakennetta sekä kokoonpanolinjan suunnittelua. Lopuksi esitetään tulokset luvussa 4 ja johtopäätökset kehitysehdotuksineen luvussa 5.

2. KIRJALLISUUSKATSAUS

Salmisen (2011, s. 6) mukaan kuvailevaa kirjallisuuskatsausta voidaan nimittää yleiskatsaukseksi, eikä se sisällä tiukkoja ja tarkkoja sääntöjä. Siksi se soveltuu hyvin tähän työhön, jonka pääpaino ei ole kirjallisuustutkimuksessa. Työssä esitetty kirjallisuuskatsaus on toteavaa tutkimusta, jonka tavoitteena on Eskelisen ym. (2014, s. 89) mukaan kerätä kirjallisuudesta tietoa tutkimuksen kohteesta sekä tarkistaa, että tiedot ovat totuudenmukaisia.

Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään kokoonpanolinjaan liittyviin lean-periaatteisiin, kokoonpanolinjoihin ja niiden tasapainotukseen sekä sekvensointiin, työntutkimuksen taustaan, investoinnin takaisinmaksun teoriaan sekä DFX-menetelmiin. Kirjallisuuskatsauksessa käytetty aineisto on peräisin Tampereen yliopiston kirjaston tarjoamista tietokannoista. Lähteinä käytetään ensisijaisesti vertaisarvioituja julkaisuja. Käytettäessä kirjoja lähteinä, varmistetaan kirjoittajan pätevyydestä.

2.1 Lean

Maailman huomio kiinnittyi Toyotaan ensimmäisen kerran 1970-luvulla. Tällöin havaittiin, että japanilaisessa laadussa ja tehokkuudessa oli jotain erityistä. Japanilaiset autot olivat kestävämpiä verrattuna amerikkalaisiin ja eurooppalaisiin autoihin, eivätkä vaatineet korjausta yhtä paljon. Vielä erityisempi havainto Toyotasta tehtiin 1980-luvulla. Se oli tapa, jolla Toyota suunnitteli ja valmisti autoja kilpailijoita nopeammin, halvemmalla ja paremmin. (Liker, 2021)

Toyotan tehokkuuden taustalla oli TPS (engl. Toyota Production System), joka on Taiichi Ohnon kehittämä Toyotan tuotantojärjestelmä. TPS:n periaatteiden pohjalta kehittyi lean-valmistus, joka tunnetaan myös nimellä lean-tuotanto tai yksinkertaisesti lean. (Wilson, 2015). Nimi lean tulee John Krafickin toteamuksesta, että TPS käyttää vähemmän kaikkea luodessaan saman arvon, joten kutsukaamme sitä lean:iksi (Womack ym., 2007).

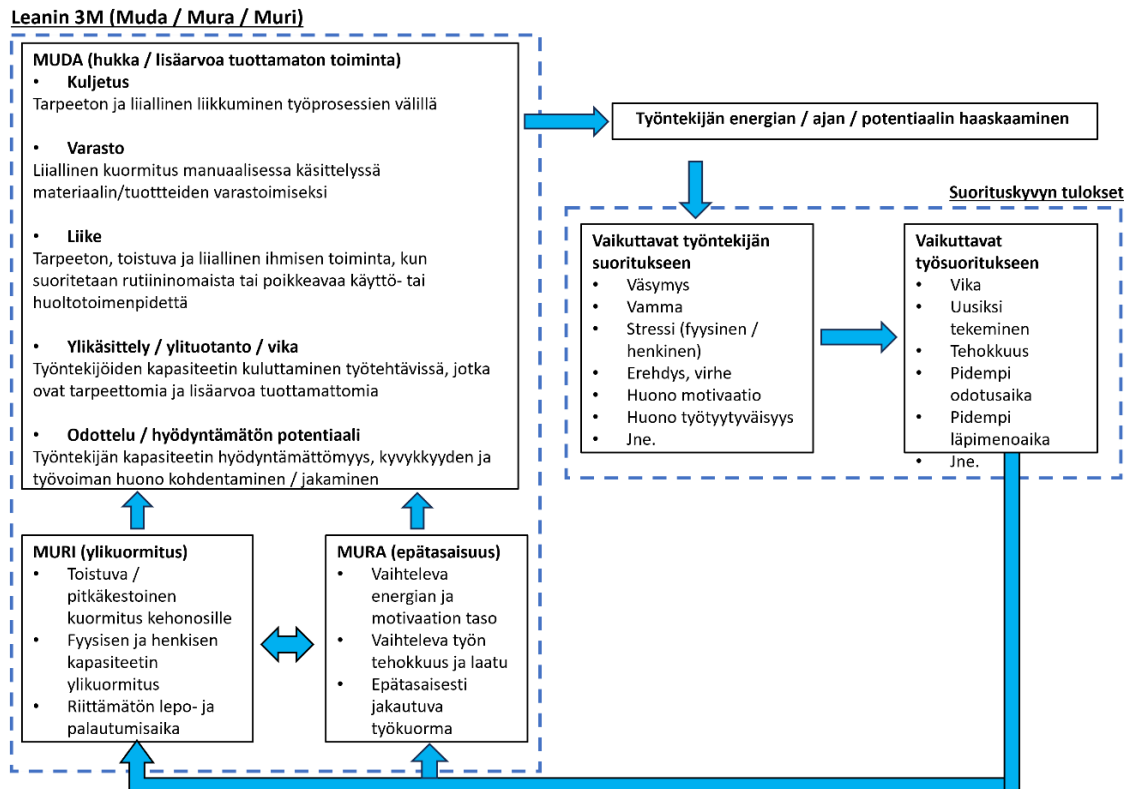
Leania voidaan pitää filosofisena ajattelutapana. Tällainen lähestymistapa voidaan jakaa 4 eri alueeseen: Asiakas ensin, kunnioita työntekijöitä, mene ja näe (gemba) sekä jatkuva parantaminen (kaizen). Filosofian tarkoituksena on parantaa virtausta ja jalostusarvoa eliminoimalla hukkaa. On hyvä huomioida, että päätavoitteena ei ole hukan eliminointi, vaan läpimenoajan lyhentäminen. Läpimenoajan nopeutumisella

saavutetaan taloudellista kasvua. (Cory Bronger & Robert Corbitt, 2021; Mann, 2010; S. Vinodh, 2022)

2.1.1 Hukka

Lean-periaatteen taustalla oleva perusidea on yksinkertaisesti sanottuna jatkuvaa työskentelemistä valmistusprosessin hukkien poistamiseksi (Salah Eldein & Sobhi, 2019). Näiden hukkien lähteitä käsitellään konseptissa 3M. Nämä 3M kirjainta tulevat sanoista Muda, Muri ja Mura. Muda tarkoittaa hukkaa, Muri ylikuormitusta ja Mura epätasaisuutta. Muda keskittyy toimiin, jotka eivät tuota lisäarvoa tuotantojärjestelmään tai johtavat hukkaan. Muri on tilanne, jossa koneita tai työntekijöitä kuormitetaan enemmän kuin mihin he kykenevät. Muri johtaa laitevikoihin, onnettomuuksiin, terveysongelmiin ja virheisiin. Mura tarkoittaa tuotannossa esiintyvää määrällistä tai laadullista vaihtelua tai epäsäännöllisyyttä. Tällöin prosessi vaihtelee jatkuvasti, kiire ja odottelu vuorottelevat. Tällainen epätasaisuus johtuu kysynnän vaihtelusta, epätasaisista aikatauluista tuotannossa ja sisäisistä keskeytyksistä. Näitä ovat esimerkiksi laiteviat, materiaali puutteet ja -virheet. Epätasaisuus (mura) lisää ylikuormitusta (muri) ylikuormittamalla prosessia kysynnän ollessa suurta. Lisäarvoa tuottamaton toiminta (muda) on sekä syy että seuraus epätasaisuudelle (mura). Siksi on välttämätöntä poistaa hukkaa (muda) ja epätasaisuutta (mura), mikäli halutaan poistaa mitä tahansa näistä kolmesta M:stä. Epätasaisuutta ja ylikuormituksia voidaan välttää tasaisen virtauksen avulla. (Nicholas, 2018)

Radin Umar ym. (2023) sisällyttävät käsitteeseen 3M myös ergonomian näkökulman. He kuvaavat, kuinka leanin ja ergonomian välille on löytynyt 4 yhteistä teemaa. Nämä ovat: ihmisen energian tuhlaus, epätasainen työtaakan jakautuminen, työntekijöiden fyysinen ja henkinen ylikuormitus sekä työntekijöiden suoritustason vaikutus työn suoritukseen. Kuva 3 esittää, kuinka näiden teemojen perusteella voidaan tarkastella muda, mura ja muri käsitteitä lean-valmistuksessa ergonomian näkökulmasta.



Kuva 3. Ergonomian näkökulma yhdistettynä käsitteisiin muda, muri ja mura. Perustuu lähteeseen (Radin Umar ym., 2023).

Mudaa, eli leanin perinteistä hukkaa, ovat kaikki lisäarvoa tuottamattomat kustannuksen aiheuttajat (Elbert, 2013). Elbertin (2013, ss. 9–11) mukaan 9 tärkeintä hukan aiheuttajaa ovat: (Ensimmäiset 7 kohtaa ovat Toyotan alkuperäiset 7 hukkaa.)

1. Ylituotanto, jolloin valmistetaan enemmän tuotteita mitä on tilauksia. Tällöin tarvitaan enemmän työntekijöitä, varastoa ja tuotantotilaa kuin olisi tarpeen.
2. Tarpeettomat varastot. Liiallisten materiaalien ja valmiiden tai keskeneräisten tuotteiden varastointi pidentävät läpimenoaika, aiheuttavat tuotteiden vanhenemista, lisäävät varastointikustannuksia ja piilottavat toimittajien ja tuotannon ongelmia.
3. Odottelu (seisonta-aika). Odotellessa työntekijä ei tuota tuotteelle lisäarvoa, vaan odottaa esimerkiksi osaa tai koneen tekemää työvaihetta.
4. Materiaalin tarpeeton liikuttaminen. Valmiiden tuotteiden tarpeeton siirtely varastoon tai sieltä pois. Myös keskeneräisten tuotteiden siirtäminen pitkiä matkoja seuraavalle työvaiheelle on hukkaa.

5. Ylikäsittely tai virheellinen käsittely. Osien suunnittelu siten, että syntyy tarpeettomia vaiheita. Ylikäsittelyä on myös tuotteen valmistaminen laadukkaammaksi kuin on tarpeen.
6. Tarpeeton liike työskentelyssä. Kaikki työntekijän tekemä liike, joka ei tuo lisäarvoa tuotteelle. Tämä tarkoittaa kurottelua, kävelyä, työkalun etsimistä, tarpeettoman tekstin lukemista yms.
7. Virheet. Osien tai tuotteen virheellinen käsittely. Kaikki toimet, jotka johtavat uudelleen käsittelyyn, korjaukseen tai romutukseen.
8. Käyttämätön luovuus. Ei hyödynnetä työntekijöiden ideoita, taitoja ja oppimista.
9. Ympäristöystävällisyys. Tämä kohta sopii hyvin nykytilanteeseen. Kaikenlaisten muovien vähentämisellä on valtavat mahdollisuudet alentaa kustannuksia, pienentää jätteen syntyä ja hallita saasteita.

2.1.2 Lean-työkaluja ja -käsitteitä

Lean-valmistuksessa on useita työkaluja prosessien tehostamiseen ja hukan poistamiseen. Näitä ovat esimerkiksi Kaizen ("kai" tarkoittaa muuttaa ja "zen" paremmaksi), arvovirtakuvaus (Value Stream Map), 5S, tuotantosolu, Poka yoke (virheiden ennaltaehkäisy), SMED (Single Minute Exchange of Dies), Kanban, Just-In-Time (JIT), Jidoka, Heijunka jne. (Bravo-Paliz & Avilés-Sacoto, 2023; S. Vinodh, 2022)

Heijunka on japanilaisten termi tuotannon tasaamiselle. Heijunkan avulla vähennetään mudaa, muraa ja muria. Tuotannon tasapainottamisessa tuotanto sopeutetaan kysynnän muutoksiin. Onnistuneen tasapainotuksen seurauksena saadaan joustavuutta, vähennetään varastoja, tasapainotetaan työntekijöiden ja koneiden kuormaa sekä hallitaan paremmin tilauksia tavarantoimittajilta. Tavoitteena on tasapainottaa tuotantoa volyymiin ja tuotevalikoimaan perustuen. (Liker, 2021; S. Vinodh, 2022)

5S lean-työkalu tulee sanoista Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu ja Shitsuke, jotka tarkoittavat lajittelua, järjestystä, kiiltoa, standardisointia ja ylläpitämistä. Menetelmän tarkoituksena on ylläpitää organisoitua työympäristöä ja sitä kautta vaikuttaa työskentelyn tehokkuuteen. Menetelmän avulla vähennetään hukkaa ja edistetään työturvallisuutta. (S. Vinodh, 2022, ss. 19–24)

JIT-tuotantomenetelmät edellyttävät ainoastaan tarpeellisen tuotteen valmistamista tarpeellisen määrän ja tarvittavassa ajassa. Näiden menetelmien tavoitteena on vastata asiakkaiden vaatimuksiin ilman suuria varastoja tai varastopuutteita. Käytettäessä JIT-menetelmiä tulisi noudattaa kolmea pääperiaatetta:

- Imuohjaus: osta vain tarvittava ja valmista vain se minkä pystyt myymään.
- Jatkuva virtaus: tasoita valmistus siten, että tuotanto on jatkuvasti liikkeessä.
- Tahtiaika: aikatauluta tuotteiden valmistuminen asiakaskysynnän mukaan.

JIT-menetelmien mukainen tuotanto vähentää hukkaa sekä lisää tuottavuutta ja laatua. (Protzman ym., 2023; Steiner & Yeomans, 1996; Townsend, 2012)

2.2 Kokoonpanolinjat

Kokoonpanolinja on tuotantojärjestelmä, jossa työpisteet ovat sijoitettuna sarjaan. Työkappaleita liikutetaan näiden työpisteiden välillä yleensä kuljetusjärjestelmän, esimerkiksi kuljetushihnan avulla. Ensimmäinen tällainen teollisuuden kokoonpanolinja esiteltiin 1900-luvun alussa Henry Fordin toimesta. Linja suunniteltiin tehokkaaksi ja erittäin tuottavaksi tavaksi valmistaa tiettyä tuotetta, tässä tapauksessa Fordin Model-T autoa. Salvesonin (1955) mukaan ensimmäinen tunnettu kokoonpanolinja perustettiin jo Yhdysvaltain vapaussodassa 1700-luvun lopussa Eli Whitneyyn toimesta muskettien valmistukseen. (Boysen ym., 2008; Grzechca, 2011)

Kokoonpanolinjat ovat käytetyin menetelmä massatuotannossa. Ne mahdollistavat tuotteiden kokoonpanon työntekijöiden vähemmällä koulutuksella sekä erilaisilla koneilla ja roboteilla. Kokoonpanojärjestelmien tavoitteena on lisätä linjan tehokkuutta maksimoimalla läpimenon ja kustannusten suhde. (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 3)

Henry Fordin ajoista lähtien tuotevaatimukset ja sitä kautta tuotantojärjestelmien vaatimukset ovat muuttuneet merkittävästi. Yritysten on pystyttävä vastaamaan asiakkaiden monipuolisiin tarpeisiin ja mahdollistettava tuotteiden yksilöllinen räätälöinti. Esimerkiksi saksalainen autonvalmistaja BMW tarjoaa vaihtoehtoisia ominaisuuksia autoihin, jolloin tarjolla on teoriassa 10^{32} eri mallia. (Boysen ym., 2008; Meyr, 2004)

Kokoonpanolinjat ovat kehittyneet alkuaikojen tiukasti tahdistetuista ja suorista yksimallilinjoihin joustavampiin järjestelmiin. Näitä ovat esimerkiksi linjat rinnakkaisilla työpisteillä, asiakkaiden tarpeisiin perustuvat seka- ja monimallilinjat, U-muotoiset linjat sekä tahdistamattomat linjat välipuskureineen. (Becker & Scholl, 2006)

Valitaan millainen kokoonpanolinja tahansa, siihen liittyy aina tärkeä ongelma: kokoonpanolinjan tasapainotus. Se muodostuu linjalla valmistettavien tuotteiden kokonaistyökuorman jakamisesta linjan työpisteiden kesken. Kokonaistyökuormaan sisältyvät kaikki työvaiheet, joita tarvitaan valmiin tuotteen saamiseksi. Linjan tasapainotuksella varmistetaan, että linja toimii mahdollisimman tehokkaasti. Tämä on tärkeää, sillä kokoonpanolinjan asennus vaatii yleensä suuria pääomasijoituksia. (Becker & Scholl, 2006)

2.2.1 Kokoonpanolinjojen jaottelu

Lapinleimu ym. (1997) jakavat kokoonpanolinjat toimintaperiaatteensa mukaan tahtilinjoihin ja epätahtilinjoihin. Boysen ym. (2008) jakavat edelleen epätahtilinjat synkronisiin ja asynkronisiin järjestelmiin. Becker ja Scholl (2006) jaottelevat linjat vielä niillä kokoonpantavien tuotteiden perusteella yhden mallin linjoihin sekä seka- ja monimallilinjoihin.

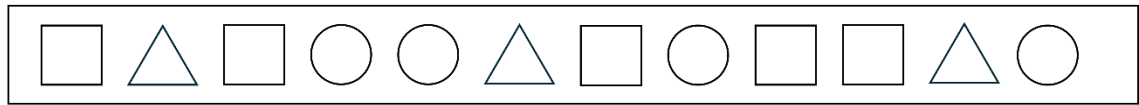
Tahtilinjassa kokoonpantavat tuotteet tai yksiköt kuljetetaan vakionopeudella linjan läpi. Nimensä mukaisesti yksiköt ovat työpisteillä aina saman ajan. Henry Fordin ensimmäinen kokoonpanolinja oli tahtilinja, jossa hän tasapainotti työkuorman jokaisen linjalla työskentelevän operaattorin kesken. (Ghirann, 2017)

Epätahtilinjassa tuotteiden työvaiheille ei ole yhteistä aikamäärettä. Tuotteet siirretään seuraavalle puskurivarastolle tai työpisteelle heti kun kyseisessä työpisteessä suoritettavat toimenpiteet saadaan tehtyä. Työpisteiltä tuotteet voidaan siirtää samanaikaisesti, jolloin kyseessä on synkroninen järjestelmä, tai erikseen, jolloin kyseessä on asynkroninen järjestelmä. Järjestelmässä olevilla puskurivarastoilla voidaan kompensoida vain tilapäisiä eroavaisuuksia työpisteiden työajoissa. Muuten puskurivarastojen kapasiteetit täyttyvät ja ne menettävät merkityksensä. (Boysen ym., 2008)

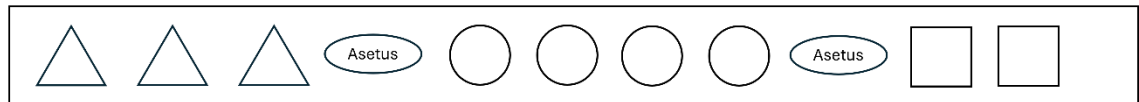
Yhden mallin linjassa kaikki työpisteet ovat identtisiä ja linjalla valmistetaan nimensä mukaisesti vain yhtä tuotetta. Sekamallilinjassa tuotetaan erilaisia tuotteita mielivaltaisessa järjestyksessä. Sekamallilinjoihin hyödynnetään yleisesti tuotannossa, jossa valmistetaan: tuotteita, joissa on monia eri variaatioita, pienten tilausmäärän tuotteille tai erätuotannossa. Tavallisten tuotteiden variaatiot ovat valmistajalle tärkeitä, sillä niiden kysyntä on nykyajan markkinoilla asiakaslähtöistä. Monimallilinjassakin valmistetaan useampaa tuotetta, mutta valmistus tapahtuu samanlaisten tai samankaltaisten tuotteiden erissä, joiden välissä suoritetaan asetustoimenpiteitä. (Becker & Scholl, 2006; Kamal Uddin ym., 2010) Kuva 4 havainnollistaa erimallisia kokoonpanolinjoja.



Yhden mallin linja



Sekamallinlinja



Monimallinlinja

Kuva 4. Yhtä ja useampaa tuotetta valmistavat kokoonpanolinjat. Perustuu lähteeseen (Becker & Scholl, 2006).

Rekiekin ja Delchambren (2006, ss. 19–20) mukaan kokoonpanon ja valmistuksen kysyntäennusteesta voidaan päätellä tietyllä ajanjaksolla valmistettavien tuotteiden määrä. Tavoitteeseen pääseminen luo vaatimuksia ihmisille, laitteille ja muille resursseille. Siksi kysyntäennuste auttaa laatimaan asianmukaisia tuotantosuunnitelmia ja valitsemaan parhaiten soveltuvan tuotanto-/linjamallin. Taulukko 1 esittelee tärkeimmät tekijät, jotka vaikuttavat valitaanko yhden mallin linja, seka- vai monimallinlinja. Mikäli jonkin mallin ehdot täyttyvät, on kyseinen kokoonpanomalli paras valinta.

Taulukko 1. Linjamallin valintaan vaikuttavat tekijät (Becker & Scholl, 2006; Boysen ym., 2008; Rekiek & Delchambre, 2006, ss. 19–20).

	YHDEN MALLIN LINJA	SEKAMALLILINJA	MONIMALLILINJA
KYSYNTÄ	Jatkuvaa		Vaihtelee hitaasti
TOIMITUS	Todella lyhyessä ajassa	Ei tarvitse olla lyhyessä ajassa	Lyhyessä ajassa
RAKENNE	Tuotteen rakenne eroaa selvästi muista tuotteista	Jokainen tuote melko samanlainen (tuoteperhe)	Jokainen erä koostuu samoista tai samankaltaisista tuotteista
TAKAISINMAKSU	Voidaan sisällyttää tuotteiden hintaan	Ei voida kohdistaa yhteen tuotteeseen	
KOKOONPANO	Vaatii paljon resursseja, raskaita koneita	Onnistuu samoilla resursseilla	Vaatii raskaita koneita osassa tuotteista
ASETUSAIKA	Ei tarvita	Oltava lyhyt	On lyhyt
VAIHEAIKA		>1 min	Vaihtelee tuote-erän mukaan

Taulukko 1 selventää, kuinka kysyntään ja kokoonpanoon liittyvät asiat määrittävät parhaimman linjamallin. Kysyntään liittyen toimitusaika sekä kokoonpanoon liittyen tarvittavat resurssit ja asetusatjat ovat ratkaisevassa roolissa.

2.2.2 Kokoonpanolinjan käsitteitä

Tahtiaika tulee saksankielisestä sanasta ”takt”, joka viittaa musiikin rytmiin tai kapellimestarin tahtipuikkoon. Sana itsessään tarkoittaa täsmällistä aikaväliä, sykliä tai toistoa. Tahtiaika tarkoittaa tahtia, jolla tuotteen on valmistuttava, jotta asiakaskysyntä saadaan tyydytettyä. Tahtiaika lasketaan jakamalla käytettävissä oleva työaika asiakaskysynnällä:

$$\text{Tahtiaika} = \frac{\text{Käytettävissä oleva työaika}}{\text{Asiakaskysyntä}},$$

jossa käytettävissä oleva työaika on kokonaistyöaika, josta on vähennetty tauot, seisokit, yms. ja asiakaskysyntä on keskimääräinen asiakaskysyntä tietyltä ajanjaksolta. Tahtiaika muuttuu asiakaskysynnän muuttuessa. Esimerkiksi Toyota analysoi

asiakaskysyntää kuukausittain ja laskee uuden tahtiajan sen mukaan. (Miltenburg, 2007; Rother & Shook, 2018, s. 17; Simons & Zokaei, 2005; Womack & Jones, 2003, s. 352)

Vaiheaika, joka tunnetaan englanniksi termillä *cycle time*, tarkoittaa aikaa, joka kuluu yhden vaiheen suorittamiseen linjalla. Linjan pisimmän vaiheajan omaava vaihe määrittelee, kuinka usein osa tai tuote todellisuudessa valmistuu linjalta. Kaikkien vaiheaikojen ollessa yhtä suuret, linjan sanotaan olevan tasapainossa. Ihannetilanteessa vaiheajat ovat jatkuvasti yhtä suuret kuin tahtiaika, kuitenkin sitä ylittämättä. Tällöin työpisteille ei synny odottelua eikä varastoja, jolloin linja virtaa tehokkaasti. (Baudin, 2020; Rother & Shook, 2018, s. 17; Simons & Zokaei, 2005; Womack & Jones, 2003, s. 348)

Läpimenoaika, englanniksi *lead time*, tarkoittaa aikaa, joka tarvitaan tuotteen etenemiseen konseptista lanseeraukseen, tilauksesta toimitukseen tai raaka-aineesta asiakkaan käsiin. Läpimenoaika sisältää käsittelyajan lisäksi odotusajan ennen prosessia, sen aikana tai sen jälkeen. (Rother & Shook, 2018, s. 17; Womack & Jones, 2003, ss. 349, 352)

Käsittelyaika, englanniksi *processing time*, on aika, jolloin tuotetta työstetään joko suunnittelussa tai tuotannossa ja aika, jolloin tilausta todellisuudessa käsitellään. Normaalisti varsinainen käsittelyaika on vain murto-osan läpimenoajasta. (Womack & Jones, 2003, s. 351)

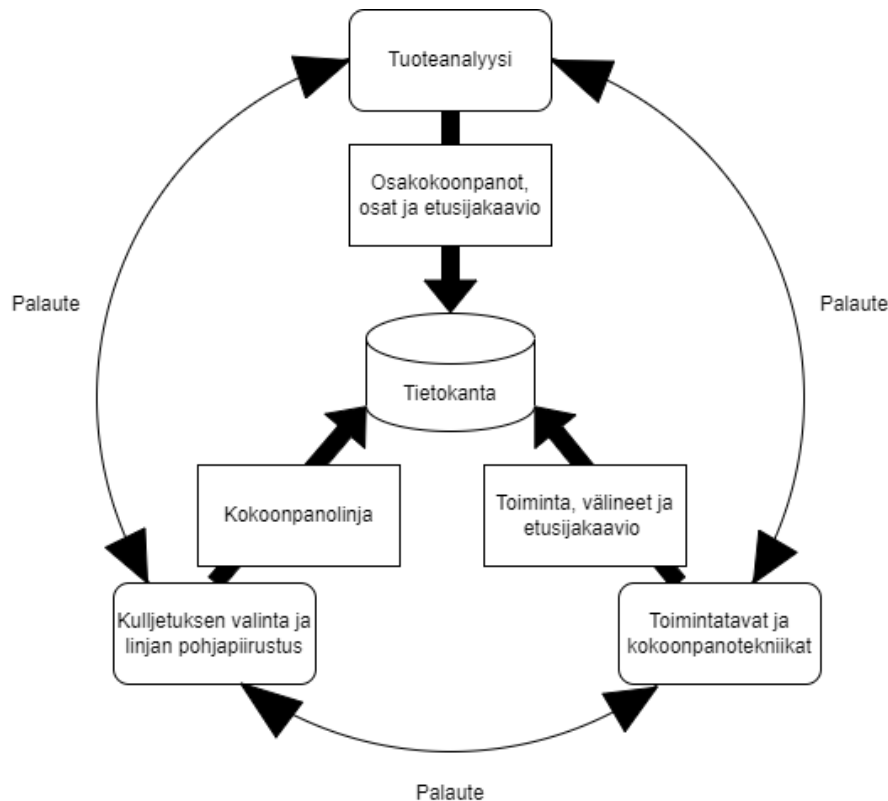
2.2.3 Kokoonpanolinjan suunnittelu

Koska ihmisten tekemä suunnittelu on aikaa vievää, on viime vuosina yritetty tutkia puoliautomaattisten suunnittelumenetelmien käyttöä kokoonpanolinjojen suunnittelussa. Termi suunnittelu sisältää systemaattisia suunnitteluprosesseja ennen lopullisen suunnitelman toteuttamista ongelmien ratkaisemiseksi. Suunnittelu erottuu muista menetelmistä käytetyn tarkkuuden, asiantuntemuksen ja huolellisuuden perusteella. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon erilaiset tekijät, jotka vaikuttavat tai saattavat vaikuttaa suunnitelmaan. Kyseessä ei ole ainoastaan vanhojen menetelmien kopioiminen, vaan luovuudella on suuri rooli suunnittelussa. (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 3)

Kokoonpanolinjan suunnitteluun kuuluvat tuotteiden, prosessien ja laitoksen pohjapiirustuksen suunnittelu ennen linjan rakentamista (Kuva 5). Nämä eri vaiheet ovat vuorovaikutuksessa keskenään linjan suunnittelun eri vaiheissa. Tuotteiden suunnittelussa tuotteiden rakennetta tarkastellaan esim. DFA-menetelmän sääntöjen ja

kokoonpanon vaiheiden etusijarajoitusten näkökulmasta. (Pierre De Lit ym., 2003; Rekiek & Delchambre, 2006, s. 3)

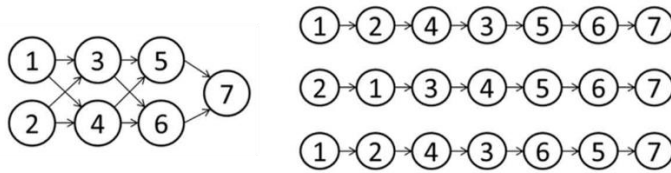
Prosessien suunnittelun tarkoituksena on tarkastella kokoonpanotekniikkaa ja mahdollisia toimintatapoja (manuaalinen, automatisoitu, robotti) kullekin työvaiheelle. Työvaiheiden määrittäminen työpisteille ja työpisteiden sijainnit määritellään pohjapiirustuksen suunnittelussa. Tässä vaiheessa suunnitellaan työpisteillä tarvittavat resurssit kuten työkalut ja materiaalit. (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 3)



Kuva 5. Kokoonpanolinjan suunnittelun menetelmäoppi ja tiedonkulku. Perustuu lähteeseen (De Lit ym., 1999).

Kokoonpanosuunnittelu alkaa määrittämällä kokoonpanon muodostavien osien väliset suhteet. Kokoonpanosuunnittelussa eniten käytetty esitystapa kokoonpanosuhteiden esittämiseen on etusijakaavio, joka sisältää kaikki kelvolliset kokoonpanon sekvenssit. Etusijakaavio muodostuu kaaviossa esitetyistä etusijarajoitteista, jotka ovat tehtävien suoritusjärjestykseen liittyvät tekniset rajoitukset. Niiden avulla kuvataan, mitkä tehtävät ovat suoritettava, ennen kuin jokin toinen tehtävä voidaan suorittaa. Kaaviossa jokaiselle tehtävälle on solmu ja solmut ovat yhdistettynä toisiinsa nuolilla kuvaten suoritusjärjestyksiä. Solmun viereen voidaan merkitä myös tehtävään kuluva aika. Kuva

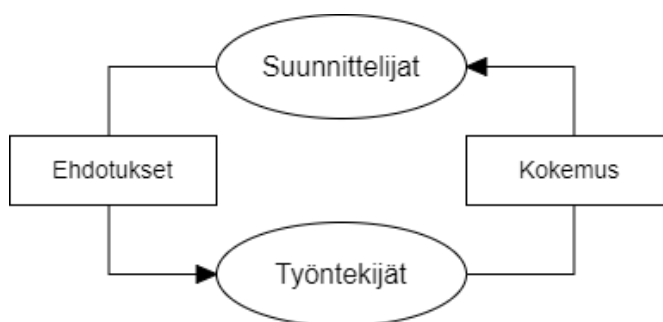
6 on esimerkki etusijakaaviosta. (Boysen ym., 2008; Pintzos ym., 2016; Rekiek & Delchambre, 2006, s. 17)



Kuva 6. Esimerkki etusijakaaviosta sekä kolme mahdollista järjestystä, jotka kaaviosta voidaan määrittää (Pintzos ym., 2016).

Etusijakaavion luomisen etuna on, että kaavio sisältää useamman vaihtoehdon kokoonpanosekvenssiksi. Tämä mahdollistaa kokoonpanosuunnittelun lisäkriteerien pohjalta parhaimman mahdollisen järjestyksen valinnan kokoonpanosuunnittelun aikana. Huonona puolena kaavion luomisessa on, että se on monimutkainen ja aikaa vievä tehtävä. Lisäksi se perustuu usein insinöörien käsitykseen kokoonpanosta, joten osa mahdollisista vaihtoehdoista voi jäädä huomioimatta. Ratkaisu viimeiseen ongelmaan löytyy lean-filosofian termistä genchi gembutsu, joka tarkoittaa suomennettuna ”mene ja näe”. Menemällä paikalle, jossa työ todella tehdään (gemba), saadaan todellinen kuva toiminnasta. (Pintzos ym., 2016; Townsend, 2012, s. 17)

Rekiek ja Delchambre (2006, s. 10) painottavat, että on todella tärkeää ottaa huomioon työntekijöiden, jotka tekevät varsinaisen kokoonpanotyön, tietämys mukaan suunnitteluun (Kuva 7). Heillä on kokemusta työn eri vaiheista ja menetelmistä sekä niihin liittyvistä haasteista.



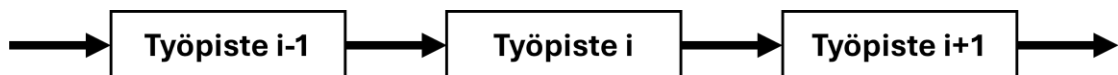
Kuva 7. Suunnittelijoiden ja työntekijöiden välinen vuorovaikutus (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 10).

2.2.4 Linjan layout ratkaisut

Tehtaan layoutia mietittäessä pääpaino on yleisesti materiaalin kulun suunnittelussa osastojen välillä. Ideaalitapauksessa tuotteen ja tehtaan alustavat analyysit johtavat

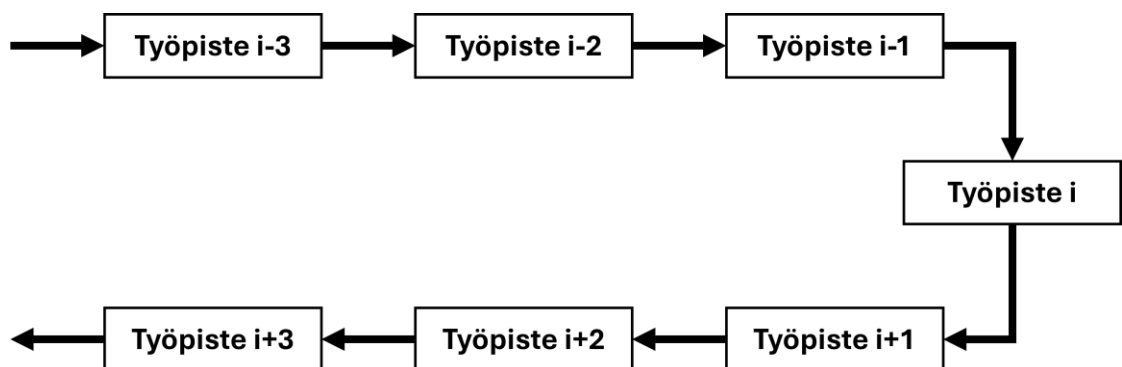
koko tehtaaseen soveltuvaan linjamalliratkaisuun (erilaiset sovellukset ovat mahdollisia). (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 21)

Sarjamallisessa linjassa yksittäiset työpisteet ovat järjestetty suoraan linjaan kuljettimen mukaisesti (Kuva 8). Kullakin työpisteellä suoritetaan yksi tai useampi tehtävä keskeneräisen tuotteen valmistamiseksi. Työpisteet voivat olla yksinkertaisia tuotantoyksiköitä todella monimutkaisissa järjestelmissä. (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 21)



Kuva 8. Sarjamallinen linja. Perustuu lähteeseen (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 21).

Lean-periaatteen JIT (Just In Time) myötä on tunnistettu työpisteiden asemoinnin U-malliseen linjaan tuovan useita hyötyjä verrattuna perinteiseen kokoonpanoon (Kuva 9). U-mallinen linja lisää näkyvyyttä ja tehostaa kommunikaatiota ja yhteistyötä linjan operaattoreiden kesken. Nämä asiat helpottavat ongelmanratkaisua ja parantavat tuotteiden laatua. Lisäksi operaattorit saavat monipuolisemmin osaamista, jolloin heidän motivaationsa ja joustavuutensa lisääntyvät. (Guerriero & Miltenburg, 2003; Rekiek & Delchambre, 2006, s. 21)



Kuva 9. U-mallinen linja. Perustuu lähteeseen (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 22).

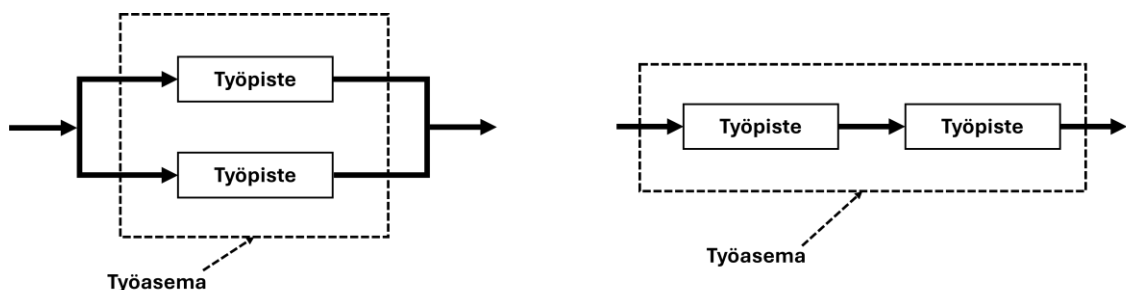
Rinnakkaiset linjat ovat tyypillisiä tilanteissa, jossa kysyntä on riittävän suurta. Tällöin on tavallista monistaa koko linja. Rinnakkaisten linjojen etuna on linjan lyheneminen, toisaalta vaaditaan kuitenkin enemmän välineistöä ja työkaluja. Etuna on myös, että ongelman ilmetessä tietyllä työpisteellä, muut voivat jatkaa toimintaansa normaalisti.

Kuva 10 havainnollistaa, kuinka rinnakkain asetetut linjat on järjestetty toisistaan riippumattomiksi. (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 21)



Kuva 10. Rinnakkainen linjamalli. Perustuu lähteeseen (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 22).

Suurilla tuotantomäärillä on mahdollista, että jonkin linjan työpisteen työaika ylittää määritetyn tahtiajan. Yleinen ratkaisu on luoda työasemia, joissa kaksi tai useampi työntekijä suorittaa identtisiä työtehtäviä rinnakkain tai sarjassa olevissa työaseman sisäisissä työpisteissä. Kuva 11 havainnollistaa työpisteiden sijoittelua työasemien sisällä rinnakkais- ja sarjatyypisissä työasemissa. Tällä menettelyllä vähennetään työasemalla suoritettavaan tehtävään kuluvan ajan keskiarvoa suhteessa työaseman työntekijöiden määrään. (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 21)



Kuva 11. Rinnakkais- ja sarjatyypinen työasema. Perustuu lähteeseen (Rekiek & Delchambre, 2006, s. 22).

2.2.5 Kokoonpanolinjan tasapainotus

Kokoonpanolinjoilla on suuri merkitys teollisessa tuotannossa, jossa tuotetaan suuria määriä standardoituja tuotteita. Viime aikoina kokoonpanolinjojen merkitys on kasvanut myös räätälöityjen tuotteiden pienivolyymisessä tuotannossa, massaräätälöinnissä. Kokoonpanolinjojen merkityksen ja suurehkon pääomavaatimuksen takia on niiden suunnittelulla tärkeä rooli. Tutkijat yrittävät tukea tätä suunnittelua kehittämällä kokoonpanolinjojen tasapainotusongelmia ratkaisevia optimointimalleja. Tutkijoiden

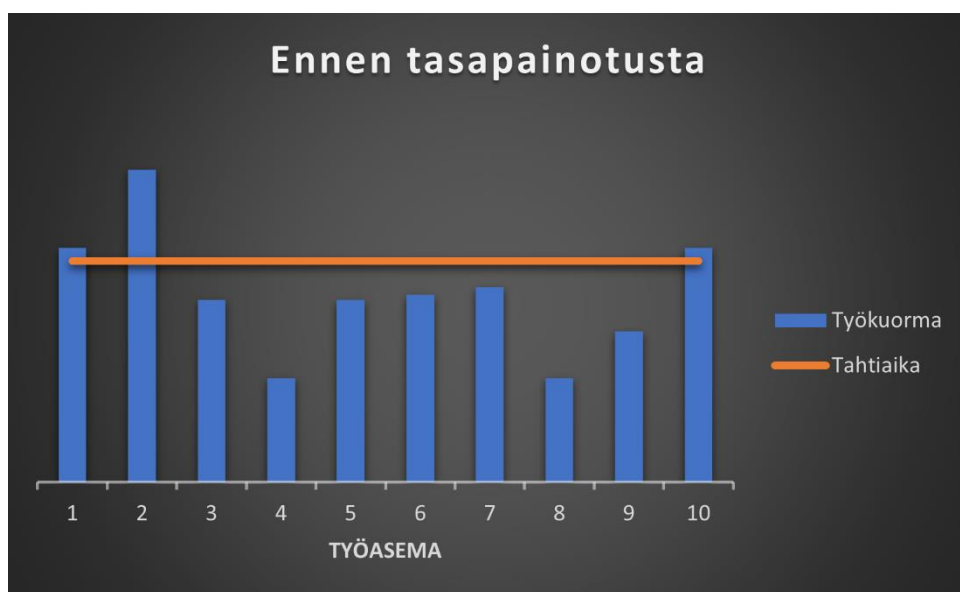
kokoonpanolinjojen tasapainottamiseen liittyvästä työstä huolimatta, ero todellisten tasapainotusongelmien ja tutkimuksen tilan välillä on huomattava. (Boysen ym., 2007)

Erilaisten kokoonpanolinjan tasapainotustekniikoiden taustalla ovat Stephensin (2019, s. 78) mukaan:

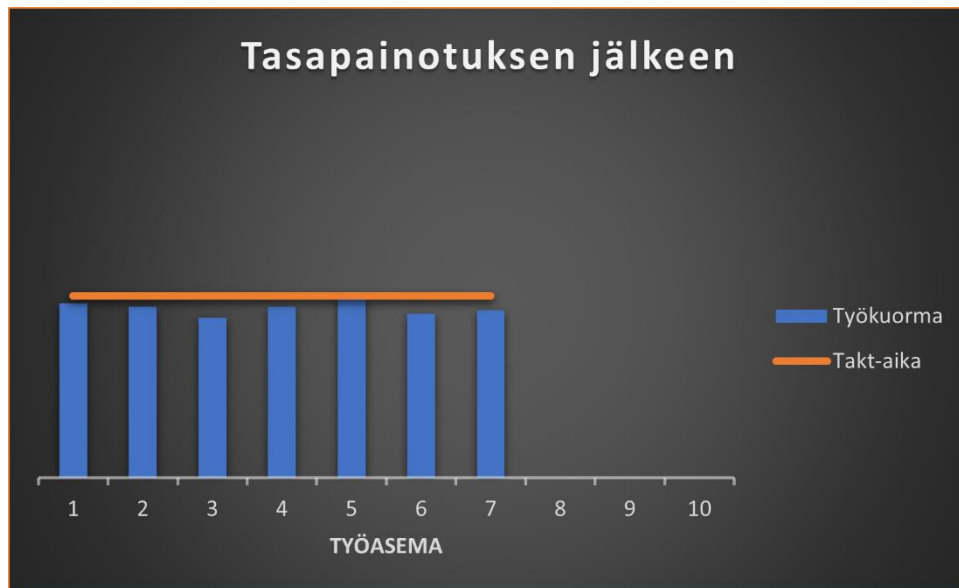
1. Tasoittaa työkuorma kokoonpanijoiden kesken
2. Tunnistaa prosessin pullonkaula
3. Vakiinnuttaa kokoonpanolinjan nopeus
4. Määrittää työpisteiden lukumäärä
5. Määrittää kokoonpanon työvoimakustannukset
6. Operaattoreiden työmäärän prosenttiosuuden määrittäminen
7. Avustaa tehtaan layoutin suunnittelussa
8. Vähentää valmistuskustannuksia

McMullenin ja Frazierin (1999) mukaan linjan tasapainotusta voidaan lähestyä kahdesta eri tavoitteesta: Pyrkiä minimoimaan työntekijöiden määrä linjalla ennalta määrätyllä tahtiajalla tai vastaavasti minimoida tahtiaika ennalta määrätyllä työntekijöiden määrällä. Kokoonpanolinjan tasapainottaminen on mahdollista, sillä toisin kuin muut valmistustoiminnot, kokoonpanotehtävät voidaan jakaa pieniin osioihin. Näitä pienempiä tehtäviä voidaan siirrellä työpisteiden välillä, kunnes kaikkien kokoonpanijoiden työkuormitus on 5 % sisällä keskiarvosta ja lähellä tahtiaikaa. Tehokkaissa yrityksissä tasapainottamiseen ryhdytään rutiinomaisesti tuottavuuden parantamiseksi tai kysynnän muutokseen vastaamiseksi. Linjan koosta ja monimutkaisuudesta riippuen tasapainottamiseen kuluva aika vaihtelee muutamassa minuutissa tehtävästä suorasta tarkkailusta useaan kuukauteen kestävään suunnitteluprojektiin. (Baudin, 2020)

Kuva 12 ja Kuva 13 hahmottavat linjan tasapainotuksen periaatteen. Kuvat saavat tasapainotuksen näyttämään petollisen yksinkertaiselta. Työpisteiden työkuormat ovat esitettyinä pystypalkkeina. Kaikkien palkkien tulisi olla alle tahtiajan. Mikäli tahtiaika ylitetään joillain työpisteistä, sitä tulisi lyhentää tehostamalla toimintaa tai määrittämällä tehtävät uudelleen. Kaikkien palkkien ollessa alle tahtiajan, ne tulisi saada mahdollisimman samanarvoiseksi ja mahdollisimman lähelle tahtiaikaa. Tällöin tuottavuus kasvaa ja vältetään tilanteelta, joissa jotkin operaattorit ovat selvästi kiireisempiä kuin toiset. (Baudin, 2020)



Kuva 12. Kokoonpanolinja ennen tasapainotusta. Perustuu lähteeseen (Baudin, 2020).



Kuva 13. Kokoonpanolinja tasapainotuksen jälkeen. Perustuu lähteeseen (Baudin, 2020).

Kokoonpanolinjan tasapainotuksesta käytetään kirjallisuudessa yleisesti nimitystä ALB, joka tulee englannin kielen sanoista assembly line balancing. ALB-käsitteen alla on esitelty erilaisia optimointimalleja, joiden tarkoituksena on tukea linjan suunnittelijaa tehokkaan kokoonpanojärjestelmän määrittämisessä. ALB:n ensimmäisestä matemaattisesta jäsentelystä vastasi Salveson vuonna 1955. Tämän perusongelman taustalla olevien lukuisten yksinkertaistavien oletuksien vuoksi tämä tutkimusala nimettiin yksinkertaiseksi kokoonpanolinjan tasapainotukseksi: SALB (engl. Simple Assembly Line Balancing). Työn tasaisesta jakamisesta työpisteille SALB menetelmän yksinkertaistuksien perusteella käytetään termiä SALBP (engl. Simple Assembly Line Balancing Problem). (Becker & Scholl, 2006; Boysen ym., 2007)

Beckerin ja Schollin (2009) sekä Baybarsin (1986) mukaan SALBP tasapainotusongelmaa koskevat seuraavat ominaisuudet:

- Tuotetaan massatuotannolla yhtä homogeenista tuotetta, tietyn tuotantoprosessin mukaan
- Kyseessä on tahtilinja kiinteällä tahtiajalla
- Toiminta-ajat ovat deterministisiä, ennakoitavissa
- Ei muita kokoonpanorajoitteita kuin kokoonpanon järjestys, etusijarajoitteet
- Kokoonpano tapahtuu yksipuoleisella sarjalinjalla
- Kaikki työpisteet ovat varusteltu yhtäläisesti

- Linjan tehokkuus maksimoidaan yrittämällä saada vaiheiden vaiheajat mahdollisimman lähelle tahtiaikaa

SALBP:iin on olemassa neljä eri lähestymistapaa. SALBP-E maksimoi linjan tehokkuuden, SALBP-1 minimoi työpisteiden lukumäärän annetulla tahtiajalla, SALB-2 minimoi tahtiajan annetulla työpisteiden määrällä ja SALBP-F etsii mahdollista ratkaisua annetuilla työpisteiden määrällä ja tahtiajalla. (Boysen ym., 2008)

Becker ja Scholl (2006) mainitsevat, että SALBP tekemät oletukset poikkeavat merkittävästi oikean elämän tilanteista. Tämän takia SALBP ei kykene tarjoamaan ratkaisuja nykypäivän yhä vaativimpiin kokoonpanosovelluksiin. Siksi tutkijat ovat keskittyneet tunnistamaan, muotoilemaan ja ratkaisemaan realistisempia ongelmia. Tällaisista ongelmista käytetään nimitystä yleinen kokoonpanolinjan tasapainotusongelma, GALBP (engl. Generalized Assembly Line Balancing Problem). GALB tutkimus pitää sisällään myös mm. U-malliset linjat UALBP (engl. U-line Assembly Line Balancing Problem) ja sekamallilinjat MALBP (engl. Mixed-model Assembly Line Balancing Problem). Boysen ym. (2007) huomauttavat, että valtavasta akateemisesta ponnistelusta huolimatta, kokoonpanolinjojen tasapainottamisen todellisuuden ja tutkimuksen välillä on edelleen huomattava ero.

Sekamallilinjan tasapainotuksessa tulee yhden mallin linjan vertikaalisen tasapainotuksen lisäksi huomioida horisontaalinen tasapainotus. Vertikaalisella tasapainotuksella tarkoitetaan työkuorman tasaista jakamista työpisteille. Horisontaalisella tasapainotuksella puolestaan tarkoitetaan eri malleista aiheutuvan työkuorman tasaista jakamista työpisteiden kesken. (Emde ym., 2010; Merengo ym., 1999)

2.2.6 Kokoonpanolinjan sekvensointi

Tuotteiden vaatimukset ja sitä kautta tuotantojärjestelmien vaatimukset ovat muuttuneet merkittävästi Henry Fordin ja hänen kuuluisan Model-T mallinsa ajoista. Alun perin kokoonpanolinjat kehitettiin yhden standardoidun tuotteen kustannustehokkaaseen massatuotantoon. Henry Fordilla oli sanonta, että asiakkaat saavat autonsa minkä värisenä tahansa, kunhan se on musta. Niistä ajoista on kauan ja nykyään tuotteisiin on tarjolla lukuisia eri optioita asiakkaiden toiveiden mukaan. Näiden tuotteiden valmistajien on käsiteltävä tuotevalikoimaa, jonka voidaan teoreettisesti katsoen ylittävän jopa useita miljardeja malleja. Sekamallilinjat mahdollistavat näin monipuolisen tuoteportfolion vaarantamatta tehokasta virtaustuotantoa. Tällaisia käytännön sovelluksia ei löydy ainoastaan autoteollisuudesta, vaan myös esim. elektroniikka-, kodinkone-, huonekalu- ja vaateteollisuudesta. (Boysen ym., 2009; Pil & Holweg, 2004)

Valitettavasti kustomoitujen optioiden asentaminen johtaa usein vaiheajojen vaihteluihin työpisteillä. Tavoitellun vaiheajan ylittyessä jollain työpisteistä syntyy ylikuormitusta, pakottaen muut pisteet odottelemaan. Tätä työaikojen vaihtelua voidaan jonkin verran kompensoida puskurivarastoilla, mutta se ei ole aina mahdollista, esim. tilanpuutteen vuoksi. (Battini ym., 2009)

Sekvensoinnin tarkoituksena on löytää paras mahdollinen kokoonpanolinjalla kokoonpantavien tuotteiden sekvenssi eli peräkkäisten toisistaan eroavien tuotteiden kokoonpanojärjestys. Parhaalla sekvenssillä tarkoitetaan tässä yhteydessä sellaista, jossa työpisteillä syntyy mahdollisimman vähän ylikuormitusta/odottelua. Tällöin koko linjan virtaus on mahdollisimman tehokasta ja sujuvaa, sekä varmistetaan tuotteiden toimitus asiakkaille ajoissa. (Lv ym., 2022; Yano & Rachamadugu, 1991)

Hwang ja Katayama (2010) mainitsevat, että kokoonpanolinjan tasapainotus ja sekvensointi liittyvät olennaisesti sekamallilinjoihin. Sekvensointi ja tasapainotus ovat riippuvaisia toisistaan: Optimaalinen sekvensointi riippuu linjan tasapainotuksen tuloksista, joihin puolestaan sekvensointi on vaikuttanut. Siitä huolimatta monissa tutkimuksissa näitä kahta ongelmaa on käsitelty erikseen.

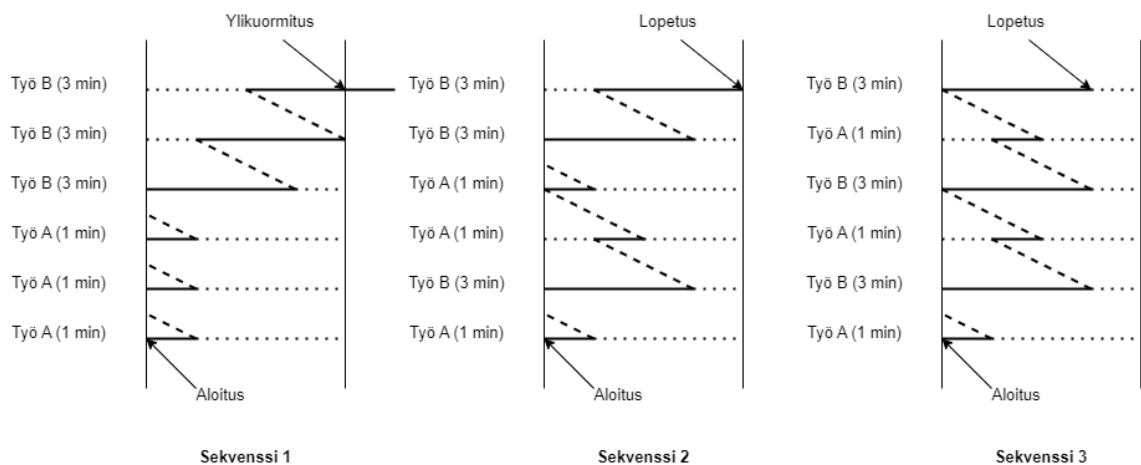
Vaikka mikä tahansa mallien sekvenssi on teknisesti toteutettavissa, voidaan sekvensoinnin kahtena päätavoitteena pitää (Bard ym., 1994):

- *Työpisteiden ylikuormituksen välttäminen:* Työpisteiden tahtiajat vaihtelevat pisteillä kokoonpantavan tuotteen mukaan. Mikäli monta työmäärältään suurempaa tuotetta on linjalla peräkkäin, aiheutuu ylikuormitusta. Ylikuormituksen välttämiseksi voidaan esim. palkata lisää työntekijöitä. Toinen kustannustehokkaampi ratkaisu, on muodostaa linjalle toimiva sekvenssi, jossa työmäärältään suurta tuotetta seuraa linjalla tuote, joka vaatii vähemmän työtä. (Boysen ym., 2009)
- *Materiaalin virtauksen tasapainottaminen:* Eri tuotteet vaativat erilaisia osia ja materiaaleja, joten noudatettu sekvenssi vaikuttaa materiaalityösuorituksiin. Kokoonpanolinja on osa tuotantoketjua, joten sen on tuettava JIT-toimitusketjua. JIT-menetelmään perustuvat sekvensointimenetelmät pyrkivät tasapainottamaan materiaalityösuoritusajat pitkillä aikavälillä tasapainottamalla osien kulutuksen. (Boysen ym., 2009)

Näiden kahden tavoitteen toteuttamiseksi voidaan Boysen ym. mukaan (2009) sekvensointia lähestyä kolmella eri tavalla:

1. *Sekamallisekvensointi*, joka pyrkii välttämään tuotannon ylikuormitustilanteet yksityiskohtaisen tuotantosuunnitelman avulla. Suunnitelmassa huomioidaan työajat, työntekijöiden liikkeet, työpisteiden rajoitteet ja muut linjan toiminnalliset rajoitteet.
2. *Auto sekvensointi*, jossa ylikuormitusta pyritään minimoimaan erikseen määritellyillä rajoitteilla. Kyseistä lähestymistapaa käytetään yleisesti autoteollisuudessa, josta se on saanut nimensä.
3. *Taso ajoitus*, jossa tavoitteena on materiaalikulutuksen tasapainottaminen JIT-filosofiaa hyödyntäen. Menetelmässä määritellään ns. ideaaliset tuotantonopeudet, joiden pohjalta sekvensointi tapahtuu. Poikkeamat todellisen ja ideaalisen nopeuden välillä pyritään minimoimaan.

Kuva 14 havainnollistaa, kuinka erilaisilla sekvensointiratkaisuilla voidaan käytännössä vaikuttaa työpisteiden työkuormaan.



Kuva 14. Erilaisten sekvensointiratkaisujen vertailu. Perustuu lähteeseen (Merengo ym., 1999).

Kuva 14 esittää kolmen eri sekvensointiratkaisun vaikutuksia työpisteiden työaikoihin. Esimerkissä on kyse tahtilinjasta, jossa tuotteen liikkuminen työpisteen läpi kestää 4 minuuttia. Linjalla valmistetaan kahta erilaista tuotetta: A ja B. Tuotteella A tahtiaika on 1 minuuttia ja tuotteella B 3 minuuttia. Linjan tahtiajan oletetaan tällöin olevan tuotteiden A ja B keskiarvo, 2 minuuttia. Kuva 14 havainnollistaa linjalla tapahtuvaa liikettä. Paksu viiva kuvaa tuotteiden liikettä niiden ollessa työllä. Pisteviiva ennen ja jälkeen paksun viivan kuvaa tuotteen liikettä työvaiheen jälkeen. Vano katkoviiva kuvaa työntekijän

kävelyä seuraavan tuotteen luo. Mikäli arvioidut tahtiajat toteutuvat, sekvenssissä 1 syntyy ylikuormitusta. Siksi sekvenssi A-A-A-B-B-B ei ole tehokas ratkaisu. Sekvenssissä 2 (A-B-A-A-B-B) ei synny ylikuormitusta, mutta viimeinen tuote saadaan valmiiksi juuri ennen tahtiaikaa. Sekvenssi 3, jossa tuotteita A ja B valmistetaan vuorotellen, on tehokkain ratkaisu. Tällöin jää varaa ennakoimattomille häiriötilanteille. Yksinkertaistettuna voidaan todeta, että tehokkain sekvensointi saavutetaan vaihtelemalla vaikeita ja helppoja työtehtäviä. (Merengo ym., 1999)

Linjan tasapainotuksen ja tuotannon sekvensoinnin suunnitteluun kuluvat ajat eroavat toisistaan. Tasapainotuksen suunnittelu kestää tyypillisesti muutamia kuukausia tai uuden linjan käyttöönoton yhteydessä jopa muutaman vuoden. Tuotannon sekvensointi puolestaan suoritetaan jopa päivä/vuoro kohtaisesti. Aikataulujen eroavaisuuksien takia näitä kahta ei kannata ratkaista samanaikaisesti. Esim. linjan tasapainotusta suunniteltaessa ei yleensä ole tarkkaa tietoa tuotteiden myynnin tulevaisuudesta, joten päivittäistä tuotesekvenssiä on miltei mahdotonta suunnitella riittävän tarkasti etukäteen. (Boysen ym., 2008, 2009; Emde ym., 2010)

2.2.7 Työntutkimus

Työntutkimuksen tavoitteena on parantaa tuottavuutta, työhyvinvointia ja kannattavuutta tehokkailla, taloudellisilla ja turvallisilla työmenetelmillä ja työolosuhteilla. Työntekijöille työntutkimuksesta ja tuottavuuden kehittämisestä saadut hyödyt näkyvät esim. parempina ansioina ja turvallisempina työmenetelminä. Yritykset tarvitsevat työntutkimusta muun muassa tavoitteiden asettamiseen, tuotannon suunnitteluun ja tasapainottamiseen sekä resurssien suunnitteluun ja kuormituksen selvittämiseen. Myös ergonomian parantaminen työkohteita, työmenetelmiä ja laitteita kehittämällä voidaan toteuttaa työntutkimuksen avulla. (Ahokas ym., 2011, s. 4)

Työntutkimuksen tavoitteena on selvittää ja kehittää tutkittavan työn työmenetelmät, ergonomia ja ajankäyttö. Työntutkimus voidaan aloittaa tutkittavan työkokonaisuuden havainnoimisella ja kuvaamisella. Käytössä olevat työmenetelmät kartoitetaan, kehitetään ja vakiinnutetaan. Tutkimukseen sisältyy myös ergonomian ja turvallisuuden tutkiminen sekä ajankäytön selvitys. (Ahokas ym., 2011, s. 6)

Työntutkimuksessa työtä tarkastellaan kolmesta eri näkökulmasta: taloudellisesta, teknologisesta ja työntekijänäkökulmasta. Taloudellisesta näkökulmasta tarkastellaan työn ja työmenetelmien kustannusvaikutuksia. Teknologisesta näkökulmasta kartoitetaan esimerkiksi mahdollisuudet uusien välineiden, prosessien tai tekniikoiden hyödyntämiseen. Työntekijänäkökulmasta selvitetään muun muassa ergonomiaan ja

turvallisuuteen liittyen mahdolliset työn väsyttävät, monotoniset, vaaralliset tai epäkäytännölliset vaiheet. (Ahokas ym., 2011, s. 6)

Työntutkimus voidaan jakaa neljään eri osa-alueeseen:

1. Menetelmätutkimus
2. Työn vakiinnuttaminen eli standardisointi
3. Työnopastus
4. Työnmittaus

Menetelmätutkimuksessa kehitetään tietyn työn tekemiseksi taloudellinen, turvallinen ja tehokas työmenetelmä. Työn standardisoinnin tarkoituksena on varmistaa, että tehokkaaksi havaittu menetelmä on kaikkien työntekijöiden käytössä. Työnopastuksella varmistetaan, että työntekijät osaavat tehokkaat ja turvalliset työmenetelmät. Työntekijöiden perehdytys on osa työnopastusta. Työnmittauksella määritetään tiettyyn työtehtävään kuluva aika, käytettäessä tiettyä menetelmää. Työnmittausta tulisi edeltää aina menetelmätutkimus, jotta varmistutaan mitattavan menetelmän taloudellisuudesta, turvallisuudesta ja tehokkuudesta. (Ahokas ym., 2011, ss. 6–7)

Stephens (2019, s. 43) määrittelee standardiajan ajaksi, joka vaaditaan tuotteen valmistamiseksi työpisteellä täyttäen seuraavat kolme ehtoa: työn suorittaa pätevä ja kokenut työntekijä, työ suoritetaan normaalilla tahdilla ja kyseessä on tietty, tarkkaan määritelty tehtävä. Työnmittauksen perusteella määriteltyjä standardiaikoja käytetään esimerkiksi kokoonpanolinjan tasapainotuksessa, tuotteiden suunnittelussa, määrittäessä palkattavien työntekijöiden määrää, ratkaistaessa valmistuskustannuksia ja myyntihintoja sekä arvioitaessa investointien kannattavuutta. Standardiajat voidaan määrittellä usealla eri tavalla. Käytetyimpiä menetelmiä ovat toiminnanohjausjärjestelmästä saatujen tietojen perusteella, perinteisellä kellotuksella sekuntikellolla ja ennalta määrättyllä standardiaikatutkimuksella (Ahokas ym., 2011, ss. 7–9; Stephens, 2019, ss. 46–47)

Työnmittauksessa tulee ottaa huomioon poikkeavuudet niin sanotusta normiajasta. Normiajalla tarkoitetaan osaavalta työntekijältä työhön kuluvaan aikaan työskenneltäessä normaalilla nopeudella ja normaaleissa olosuhteissa. Työnmittauksessa mitatuista ajoista saadaan normaaliajat kertomalla ne joutuisuuskerroin. Joutuisuuskerroin kuvastaa mitatun työnteon nopeuden eroa verrattuna normiaikaan. Tällöin normaalia työskentelynopeutta vastaa joutuisuuskerroin 1,0. Standardiaika, joista Ahokas ym. (2011) käyttävät myös nimeä työarvo, saadaan kertomalla normaaliaika apuaikakertoimella. Apuaikakertoimen avulla otetaan huomioon työajan keskeytykset,

kuten työntekijöiden jutustelu, vessakäynnit, konerikot ja -huollot. (Ahokas ym., 2011, s. 18,26–32; Stephens, 2019, ss. 48–57)

2.2.8 Investoinnin takaisinmaksu

Investoinnin takaisinmaksu on yleisesti yrityksissä käytössä oleva laskentamenetelmä. Sen avulla voidaan helposti laskea, minkä ajan kuluessa yhteenlasketut nettotuotot ylittävät investoinnin hankintakustannukset. Mikäli vuotuinen nettotuotto on vakio, eikä laskentakorkoa oteta huomioon, takaisinmaksu lasketaan hankintameno per vuotuinen nettotuotto. (Neilimo & Uusi-Rauva, 2005; Niskanen & Niskanen, 2016, ss. 319–320)

$$\text{Takaisinmaksuaika vuosissa} = \frac{\text{Investoinnin hankintameno}}{\text{Vuotuiset nettotuotot}}$$

Yllä oleva kaava olettaa, että nettotuotto on kaikkina investoinnin pitovuosina yhtä suuri. Takaisinmaksuaika voidaan laskea, vaikka vuotuiset nettotuotot vaihtelisivat, kunhan nettotuotot pystytään arvioimaan luotettavasti. Taulukko 2 havainnollistaa, miten takaisinmaksu voidaan todentaa, kun nettotuotot ovat erisuuruisia joka vuosi, hankintameno ollessa 300 000 €. Havaitaan, että takaisinmaksuaika on 5 vuotta, sillä tällöin kumulatiivinen nettotuotto on yhtä suuri kuin hankintameno. (Niskanen & Niskanen, 2016, s. 320)

Taulukko 2. Investoinnin takaisinmaksuaika vuotuisten nettotuottojen ollessa erisuuruisia (Niskanen & Niskanen, 2016, s. 320).

Vuosi	Nettotuotot (€)	Kumulatiivinen nettotuotto (€)
1	30 000	30 000
2	40 000	70 000
3	70 000	140 000
4	80 000	220 000
5	80 000	300 000 (= hankintameno)
6	80 000	380 000
7	jne.	jne.

Takaisinmaksuaika korostaa investoinnin rahoituksen merkitystä, sillä siinä lasketaan, kuinka monen vuoden nettokassavirroilla hankintameno pystytään kattamaan. Tavoitellun takaisinmaksuajan alittuessa investointia voidaan pitää kannattavana. Menetelmän puutteena on koron jättäminen laskelmasta pois, mutta se voidaan

tarvittaessa huomioida diskonttaustekijää käyttämällä. Tällöin vuotuiset nettotuotot diskontataan investoinnin ajankohtaan, jolloin saadaan selville, kuinka monen vuoden diskontatut vuosituotot tarvitaan hankintamenon kattamiseksi. (Neilimo & Uusi-Rauva, 2005; Niskanen & Niskanen, 2016, s. 319)

Takaisinmaksuajan menetelmän perusteella investoinnit, joista pääoma saadaan nopeasti takaisin, ovat edullisempia. Takaisinmaksuaika ei välttämättä ilmaise investoinnin kannattavuutta, sillä jokin investointi voi olla kannattava, jos siitä saadaan nettotuottoja pitkältä ajalta. Takaisinmaksuaika on paljon käytetty menetelmä sen puutteista huolimatta. Se soveltuu käytettäväksi muiden laskentamenetelmien kanssa esimerkiksi sellaisissa investoinneissa, joiden pitkän aikajänteen tuottoa on tavallista haastavampaa ennakoida. (Jyrkkiö & Riistama, 2000, s. 214)

2.3 Kokoonpanon kehittäminen ja DFX-menetelmät

Design for manufacturing and assembly (DFMA) -metodologia on osa design for X (DFX) -kategoriaa. Kirjain X korvataan yleensä optimointitavoitteella, kuten menetelmässä DFMA, jonka tarkoituksena on optimoida tuotteen valmistus- ja kokoonpanoprosessi. DFMA-menetelmät kehitettiin 1980-luvun alussa, jonka jälkeen ne ovat olleet laajassa akateemisessa ja teollisessa käytössä. Menetelmien tavoitteena on tukea tuotekehitysprosessia. (Formentini ym., 2022)

Tuotekehityksellä on tärkeä rooli yrityksen kilpailukyvyn ylläpitämisessä. Yritysten suurena haasteena on kehitellä jatkuvasti laadukkaampia tuotteita vähentäen samanaikaisesti tuotekehitykseen kuluvaan aikaan sekä tuotekustannuksia. Tämän saavuttamiseksi tuotekehitys ei voi toimia erillisenä asiantuntijaorganisaationa yrityksessä, vaan sen on toimittava lähempänä yrityksen johtoa ja strategista kehitystä. (Sorli & Stokic, 2009, ss. 55–56) Pärjätäkseen nykyisessä taloudellisessa kilpailussa, yritysten tulee tuottaa yhä laajempaa tuotevalikoimaa entistä alhaisemmin hinnoin. Vähentääkseen tuotekustannuksia suurin osa yrityksistä keskittyy perinteisten prosessien kehittämiseen, vaikka suurin osa tuotekustannuksista määräytyy jo suunnitteluvaiheessa. Yritysten tulisi ymmärtää ja keskittyä vähentämään tuotekustannuksia tuotekehityksen alkuhetkistä asti. (Molloy ym., 2012)

Design for assembly (DFA) -menetelmä on systemaattinen menettelytapa, jonka Formentinin ym. (2022) mukaan tarkoituksena on vähentää kokoonpanoaikaa seuraavien menetelmien avulla:

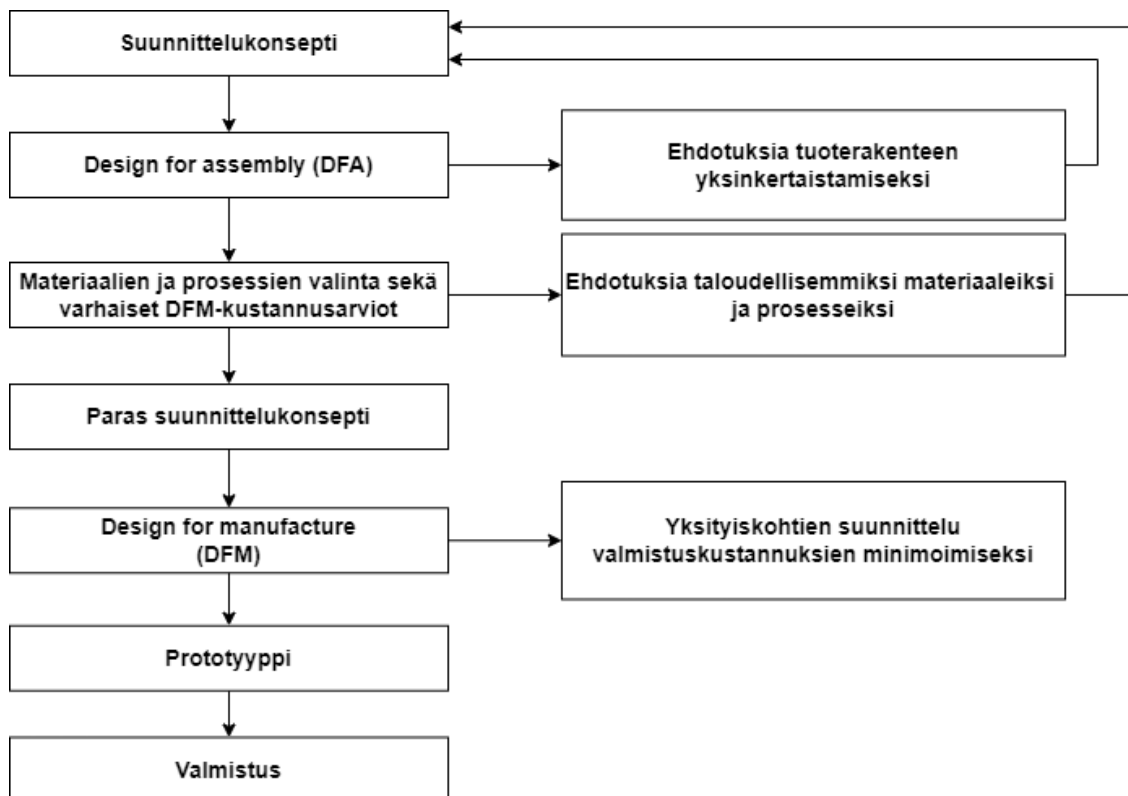
- Osien tai komponenttien vähentäminen kokoonpanossa

- Kriittisten kokoonpanotehtävien poistaminen

Design for manufacturing (DFM) on tekninen käytäntö, jolla pyritään yksinkertaistamaan komponenttien valmistusprosessia. Keinoja, joilla Formentinin ym. (2022) mukaan kustannuksia voidaan vähentää ovat:

- Raaka-aineen materiaalin valinta
- Raaka-aineen geometrian valinta
- Mittojen ja geometrioiden toleranssien määrittäminen
- Karheuden määrittäminen
- Valmistusprosessiin perustuvien muotorajoitusten spesifiointi
- Toissijaisten prosessien, mm. viimeistely, valinta

Kuva 15 havainnollistaa suunnittelun eri vaiheet, mikäli DFMA-menetelmää käytetään.



Kuva 15. DFMA-menetelmän tyypilliset vaiheet. Perustuu lähteeseen (Boothroyd ym., 2010, s. 14).

Zorowski (2016, s. 1) listaa hyödyt, jotka voidaan saavuttaa, mikäli DFA-menetelmän periaatteita hyödynnetään:

- Kokoonpanoajan lyheneminen
- Alikokoonpanojen väheneminen
- Pienemmät varastot
- Halvemmat valmistuskustannukset
- Yksinkertaisemmat kokoonpanomenetelmät
- Laadukkaammat lopputuotteet

Zorowski (2016, s. 1) kertoo, että valitettavasti DFA-menetelmä on alue, joka jää usein vähemmälle huomiolle, tai laiminlyödään kokonaan. Menetelmän käyttö sivuutetaan usein olemassa olevien suunnittelukäytäntöjen sekä kokoonpano- ja valmistusnäkökohtien seurauksena. Zorowski (2016, s. 2) mainitsee seuraavat syyt, miksi menetelmää laiminlyödään:

- Tuotteen toiminnallisuus hallitsee suunnittelun alkuvaiheita
- Perinteisiä suunnittelukäytäntöjä voi olla vaikea muuttaa
- Osan valmistuskustannukset ovat etusijalla kustannuksia mietittäessä
- Tuotteen kokoonpano määräytyy rakennesuunnittelun mukaan
- Kokoonpanoprosessia ei ole ymmärretty riittävän hyvin
- Ei olla tietoisia tuotteen tai osan DFA-periaatteista
- DFA-menetelmän vaikutuksien todentaminen suunnittelun alkuvaiheessa on parhaimmillaankin subjektiivista

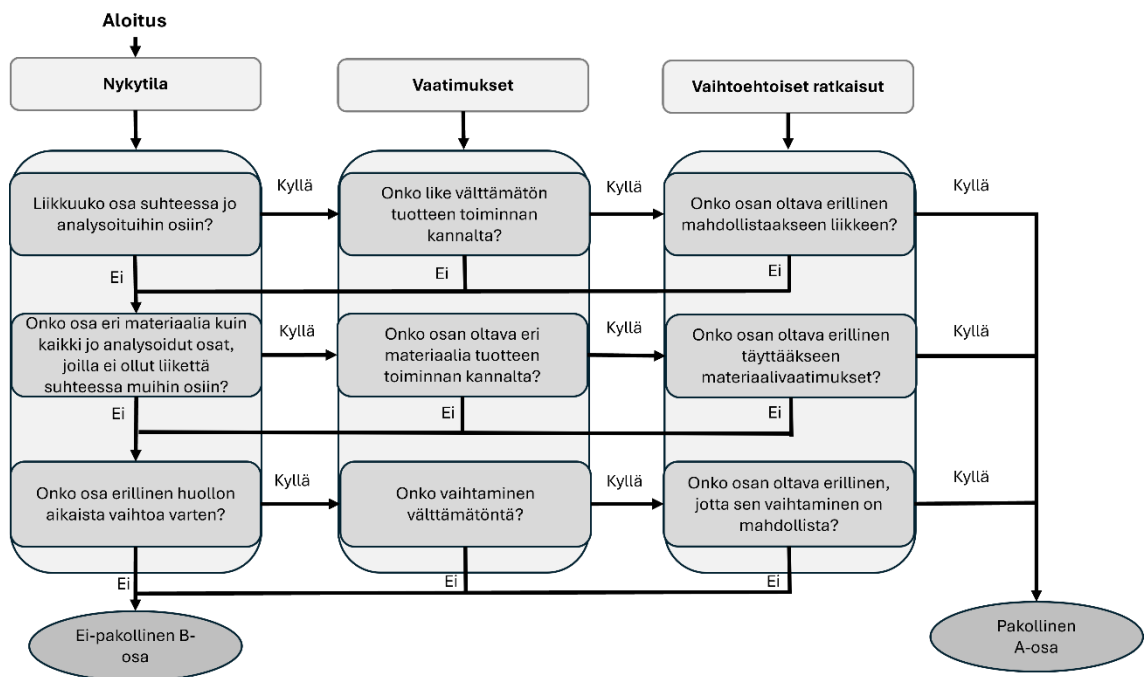
Boothroyd ym. (2010, s. 15) kertovat omien kokemuksiansa perusteella yleisimmän syyn, miksi DFMA-menetelmää ei oteta täytäntöön, olevan suunnittelijoiden kiire. He korostavat yritysten johtajien ja esimiesten ymmärrystä siitä, että suunnittelun alkuvaiheeseen panostettu aika tuottaa hyötyjä myöhemmin vähentyneiden suunnittelumuutosten kautta.

2.3.1 Toiminnallinen analyysi

Toiminnallinen analyysi on kvantitatiivinen menetelmä tarpeettomien sekä muihin osiin integroitavien komponenttien tunnistamiseksi. Toiminnallisessa analyysissä jokainen komponentti nimetään ja listataan loogisessa kokoonpanojärjestyksessä. Toiminnallinen analyysi jaetaan kolmeen osaan:

1. Perehdytään tuotteen toiminnallisiin vaatimuksiin
2. Mietitään, voiko tuotetta pitää yhtenä kokonaisuutena vai pitääkö se jakaa toiminnallisiin osa-alueisiin. (Ihanteellisinta, jos yksi kokonaisuus)
3. Jaetaan komponentit kahteen luokkaan:
 - A-komponentit suorittavat tuotteen toiminnan kannalta tärkeitä toimintoja, esim. käyttöakselit ja eristeet.
 - B-komponenttien käyttötarkoitus ei ole kriittinen tuotteen toiminnalle, esim. ruuvit ja aluslevyt.

Kuva 16 esittää toiminnallisen analyysin kaaviota, jota käytetään tuotteen komponenttien luokittelussa A- ja B-komponentteihin. Tarkoituksena on määrittää ne komponentit, jotka ovat tuotteen toiminnan kannalta välttämättömiä (A-komponentit) ja tuoda esille ne, jotka voidaan poistaa tai yhdistää välttämättömiin osiin (B-komponentit). (Swift & Booker, 2013, ss. 412–413)



Kuva 16. Toiminnallisen analyysin kaavio. Perustuu lähteeseen (Swift & Booker, 2013, s. 414).

Analyysikaaviota tehdessä on hyvä huomioida seuraavat asiat. Mikäli on epävarmaa, kumpaan kategoriaan komponentti kuuluu, tulee oletuksena valita komponentin olevan B-osa. Tuotteelta/osalta haluttu liike voi olla mahdollista toteuttaa esim. taivuttamalla joustavaa osaa, valetuilla saranoilla, lämpölaajenemisella jne. Samalla materiaalilla voi olla erilaisia toiminnallisuuksia eri tilanteissa, esim. positiivinen/negatiivinen. Nämä osat tulee analysoida erikseen. Erilaisten materiaalien tarve voi johtua eristyksestä, kulutuskestävyydestä, tiivistyksestä, värinän vaimennuksesta tms. (Swift & Booker, 2013, ss. 413–414)

2.3.2 Suunnittelutehokkuus

Tuotteen suunnittelua voidaan arvioida laskemalla suunnittelutehokkuus E :

$$E = \left(\frac{A}{A + B} \right) * 100 \%,$$

missä A tarkoittaa A-osien lukumäärää ja B vastaavasti B-osien lukumäärää. Tuotetta suunniteltaessa suunnittelutehokkuus tulisi saada mahdollisimman korkeaksi. Hyvän suunnittelun rajana pidetään 60 % suunnittelutehokkuutta. (Swift & Booker, 2013, s. 413)

2.3.3 DFA-indeksi

Boothroydin (2005, s. 229) mukaan DFA-indeksin käyttö on DFA-menetelmän olennainen osa. Hänen mukaansa kaksi päätekijää, jotka vaikuttavat tuotteen kokoonpanon tai osakokoonpanon hintaan ovat: (1) osien kokonaismäärä sekä (2) osien käsittelyn, sijoittamisen ja kiinnittämisen helppous.

Termi DFA-indeksi kuvaa lukua, joka saadaan jakamalla teoreettinen vähimmäiskokoonpano-aika todellisella kokoonpanoajalla. DFA-indeksi E_{ma} saadaan yhtälöstä:

$$E_{ma} = N_{min} \frac{t_a}{t_{ma}},$$

jossa N_{min} on teoreettinen osien vähimmäismäärä, t_a on kokoonpanon perusaika yhdelle osalle ja t_{ma} on kokoonpanon arvioitu kokonaisaika. Kokoonpanon perusajalla t_a tarkoitetaan keskimääräistä kokoonpano-aikaa osalle, jossa ei esiinny käsittelyyn, asettamiseen tai kiinnittämiseen liittyviä vaikeuksia. (Boothroyd, 2005, ss. 229–230)

Boothroyd (2005, s. 230) määrittelee osien teoreettisen vähimmäismäärän ihannetilanteeksi, jossa erilliset osat ovat yhdistettynä yhdeksi kokonaisuudeksi. Vain seuraavat kolme kriteeriä ovat hyväksyttäviä erilliselle osalle:

1. Osan on liikuttava suhteessa muihin osiin.

2. Osan materiaalin on oltava erilaista kuin muiden osien. (esim. eristävyys, johtavuuden tai värinävaimennuksen takia)
3. Osan on oltava erillinen kokoonpanon mahdollistamiseksi.

Kriteerien tarkoituksena on, että suunnittelija osaa huomioida asioita, joilla tuotetta voidaan yksinkertaistaa. Tämän prosessin kautta saavutetaan usein valtavia parannuksia valmistettavuudessa sekä säästöjä tuotteen kustannuksissa. Suunnittelumuutoksia suunniteltaessa on välttämätöntä kiinnittää huomiota muutoksien vaikutuksista myös osien kustannuksiin. Lopulta kyseessä on kuitenkin kompromissi kokoonpano- ja osakustannusten välillä. (Boothroyd, 2005, s. 230)

3. TUTKIMUKSEN EMPIIRINEN OSUUS

Tämän tutkimustyön empiirinen osuus alkaa kohdeyrityksen ja -tuotteiden kartoituksella. Analysoimalla yrityksen nykytilaa saadaan selville, mitkä tavat ja menetelmät ovat toimivia ja tehokkaita ja mitä voidaan vielä kehittää. Taustatiedon perusteella on helpompi ymmärtää sähköosaston nykyistä kokoonpanoprosessia. Kokoonpanoprosessin esittelyn jälkeen perehdytään kokoonpanolinjalle siirtyville tuotteille suoritettuun työntutkimukseen. Työntutkimuksen lisäksi generaattorille X suoritetaan tarkempi DFA-analyysi. Analyysien pohjalta suunnitellaan tuotteelle X kokoonpanoystävällisempi rakenne sekä sähköosaston alle 70 kg tuotteiden kokoonpanon mahdollistava kokoonpanolinja. Empiiristen tutkimusmenetelmien kautta saadaan vastaukset tämän työn tutkimuskysymyksiin.

3.1.1 Yritysesittely

Työ suoritettiin yritykselle Dynaset Oy, joka on vuonna 1986 perustettu ylöjärveläinen perheyritys. Dynaset on maailman johtava hydraulisten generaattoreiden, korkeapainepumppujen ja kompressoreiden valmistaja. Dynaset valmistaa laitteita, jotka tuottavat työkoneneen oman voiman avulla sähköä, korkeapainevettä, paineilmaa, alipainetta, magneettitehoa, värinää tai paineenkohotusta. Yritys toimii maailmanlaajuisesti: suoramyyntiä on yli 80 maahan ja jälleenmyyjiä on kaikilla mantereilla. (Dynaset, 2024)

3.1.2 Generaattori- ja magneettigeneraattorimallit

Sähköosastolla kokoonpantavia generaattorimalleja on yrityksen tuotekatalogin perusteella yli 200 erilaista. Mallien runsauden selittää maailmanlaajuinen myynti. Eri maanosissa on käytössä erilaiset sähköjärjestelmät: jännite ja taajuus sekä pistokkeet vaihtelevat. Generaattorin on palveltava asiakasta vastaten ominaisuuksiltaan kohdemaan tarpeita.

Generaattorimallit voidaan jaotella 4 eri ryhmään: Super Compact-, IP54-, UL- ja DC-generaattoreihin. Kaikkia malleja on saatavissa useissa eri teholuokissa. UL (Underwriters Laboratories) on palo- ja turvallisuusstandardi Pohjois-Amerikan markkinoille, joka asettaa vaatimukset sähkölaitteille ja komponenteille. Pienimmät tuotannossa olevat generaattorit ovat tasavirtageneraattoreita, joiden ulosottoteho on 1 kW ja massa 10 kg. Suurimmat ovat vaihtosähkögeneraattoreita, joiden ulosottoteho on 80 kVA, massan ollessa lähemmäs 300 kg. Projektiluontoisesti on toimitettu ainakin 250

kVA generaattori. Generaattoreiden rungot vaihtelevat esim. tehon ja IP-luokituksen mukaan.

Sähköosastolla kokoonpantaviin tuotteisiin kuuluvat myös magneettigeneraattorit. Tuotannossa kokoonpantavien magneettigeneraattoreiden tehot vaihtelevat 3–40 kW alueella. Rungot vaihtelevat niissä tehon mukaan samalla tavoin kuin generaattoreissa. Magneettigeneraattorit voidaan jakaa kahteen luokkaan: HMG- ja CMG-malleihin. HMG-mallit ovat suoraan työkoneeseen asennettavia, tavallaan kiinteitä koneita. CMG-mallit sen sijaan asennetaan erillisiin magneettiyksikköihin, jotka mahdollistavat magneettien käytön eri työkoneilla.

Kokoonpanolinjalla kokoonpantavat generaattorit ja magneettigeneraattorit rajataan alle 70 kg tuotteisiin, koska yrityksen myyntivolyymi on näissä tuotteissa. Generaattorimallien suuren määrän sekä kevyimmän ja painavimman generaattorin välisen massaeron takia päätös on helposti perusteltavissa. Linjalla ei ole tehokasta kasata harvemmin myytäviä ja raskaita malleja.

Yrityksen tuotekatalogista saadaan alle 70 kg generaattoreiden ja magneettigeneraattoreiden määräksi 19 kpl. Tässä määrässä on huomioitu ainoastaan ns. perusmallit. Perusmallisilla generaattoreilla tarkoitetaan tässä yhteydessä generaattoreita, jotka tuottavat Suomen sähköverkkoa vastaavaa sähköä ja joiden pistorasia- ja hydraulikkavarustelut vastaavat yrityksen määrittämää perustasoa. Magneettigeneraattoreissa perusmallit tarkoittavat malleja, joissa ei ole hydraulisia lisävarusteita. Mikäli otetaan huomioon lisäksi kaikki variaatiot näistä 19 perusmallista, kasvaa erilaisten tuotteiden määrä noin 200 kappaleeseen. On syytä huomioida, että kaikki näistä eivät ole enää aktiivisesti myytäviä malleja.

3.1.3 Kokoonpanoprosessin nykytila

Kokoonpanoprosessi alkaa logistiikasta. Valmiissa tuotteessa tarvittavat osat kerätään rullapöydille varaston trukkihyllyistä ja hissityyppisistä varastoautomaateista. Yhdelle rullapöydälle kerätään 1–5 tuotteen osat, riippuen keräiltävien osien koosta ja tilauksen generaattorimäärästä. Keräilyn valmistuttua logistiikkatyöntekijä kuljettaa rullapöydän sähköosaston kokoonpanojonoon, josta kokoonpanotyöntekijät hakevat rullapöydän erillisille kokoonpanosoluille. Kuva 17 havainnollistaa logistiikkatyöntekijöiden sähköosastolle keräilemiä tuotekokonaisuuksia, jotka ovat seuraavaksi menossa kokoonpanotyöntekijöiden kokoonpantaviksi erillisiin soluihin.



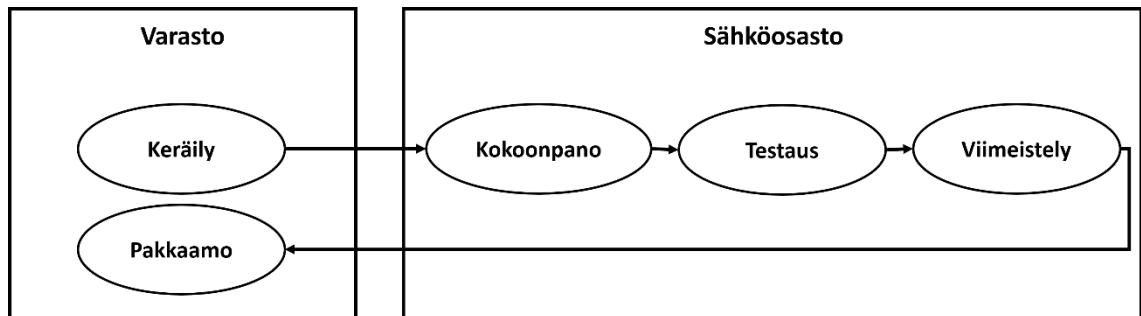
Kuva 17. Keräillyt tuotteet menossa kokoonpanosoluille.

Varsinainen tuotteen kokoonpano alkaa kokoonpanotyöntekijän toimesta kokoonpanosolussa (Kuva 18). Eri generaattorimalleille on niille erikseen nimetyt kokoonpanosolut. Solussa on näiden tiettyjen generaattoreiden kokoonpanoon tarvittavat työkalut sekä materiaalit, kuten ruuvit, aluslevyt ja mutterit.



Kuva 18. Kokoonpanosolu.

Kokoonpanosoluja, joissa kokoonpannaan linjalle suunniteltuja generaattoreita, on 5 kpl. Kokoonpano tapahtuu solujen korkeussäädettävällä ja pyörivällä työtasolla, johon generaattorit nostetaan kokoonpanon ajaksi yksi generaattori kerrallaan. Kokoonpanon aikana kaikkien generaattoreiden rungot ovat pääosin vaakatasossa. Saatuaan kaikki kyseisen työmääräimen generaattorit kokoonpantua, kokoonpanotyöntekijä kuljettaa rullapöydällä olevat generaattorit koeajoa odottavien tuotteiden jonoon. Koeajosta hyväksytyt tuotteet kuljetetaan edelleen viimeistelyyn ja sieltä varastolle. Kuva 19 selvittää tuotantoprosessin valmiin tuotteen saattamiseksi varastolle pakattavaksi.



Kuva 19. Kokoonpanoprosessin prosessikaavio.

Kuvassa esitetyt nuolet kuvaavat joko logistiikka- tai kokoonpanotyöntekijän toimesta tapahtuvaa osien/tuotteiden siirtelyä paikasta toiseen. Tämä materiaalin tarpeeton liikuttaminen on yksi nykyisen prosessin suurimmista hukista (ks. luku 2.1.1).

3.2 Työntutkimus

Pierre De Lit ym. (2003) sekä Rekiek ja Delchambre (2006) kertovat, että kokoonpanolinjan suunnitteluun kuuluvat tuotteiden, prosessien ja laitoksen pohjapiirustuksen suunnittelu ennen linjan rakentamista, kuten luvussa 2.2.3 viitattiin. Kokoonpanolinjan suunnittelu aloitettiin työntutkimuksella, jossa kaikki linjalle tulevat 19 perusmallia analysoitiin. Kyseessä oli Ahokkaan ym. (2011, s. 6) luvussa 2.2.7 kerrotun mukaisesti teknologinen näkökulma, sillä kellotuksen lisäksi kartoitettiin mahdollisuudet uusien prosessien ja teknikoiden hyödyntämiseen.

Tämän tutkimustyön myöhemmässä vaiheessa, jolloin linjan suunnitelmat ovat valmiina, linjalle suoritetaan takaisinmaksulaskelma sekä riskikartoitus. Luvussa 3.3.2 tarkemmin esitetty linjan takaisinmaksulaskelma perustuu työn ja työmenetelmien kustannusvaikutuksiin, jolloin kyseessä on työntutkimuksen taloudellinen näkökulma. Riskikartoitus suoritetaan työntekijänäkökulmasta ja siinä selvitetään turvallisuuteen liittyvät asiat. Riskikartoituksen tuloksia ei esitetä tässä tutkimustyössä.

suunnittelua lähdettiin miettimään heidän suosittlemastaan ratkaisusta: leanin-käsitteestä genchi gembutsu, ”mene ja näe”. Etusijakaavion luomisen sijaan kokoonpanojärjestystä havainnollistettiin tuotteiden kokoonpanoa analysoitaessa. Havainnot ja mahdolliset kokoonpanojärjestykset kirjattiin edellä kuvattuun taulukkoon (Taulukko 3). Järjestyksen kohdalla ei keskitytty ainoastaan järjestykseen ja tapaan, joilla tuotteet on aiemmin kokoonpantu. Erilaisia vaihtoehtoisia kokoonpanojärjestyksiä ja -tapoja kokeiltiin käytännössä, joista valittiin tehokkain ja toimivin ratkaisu.

Tuotteiden kokoonpanoa analysoitiin DFA-menetelmän näkökulmasta. Kokoonpanossa ilmenneet epäkohdat, kokoonpanoprosessia hidastavat tekijät ja niiden parannusehdotukset kirjattiin taulukkoon. Ilmenneisiin epäkohtiin kehitettiin ratkaisu mahdollisuuksien mukaan heti tai muussa tapauksessa se jätettiin tulevaisuuden kehityskohteeksi. Ainoastaan generaattorin X (kolmas tutkimuskysymys) rakenteelle suoritettiin perusteellisempi analysointi DFA-menetelmää hyödyntäen. Tämä DFA-analyysi esitetään seuraavaksi tarkemmin.

3.2.2 Generaattorin X nykyisen rakenteen DFA-analysointi

Generaattorin X rakennetta analysoitiin DFA-näkökulmasta. Analysoinnissa hyödynnettiin luvussa 2.3 käsiteltyjä menetelmiä. Ensimmäiseksi tuotteelle tehtiin toiminnallinen analyysi. Toiminnallisesta analyysistä saatiin generaattorin erilaisten osien lukumääräksi 21 kpl. Mikäli myös samanlaiset osat, ruuvit yms., otetaan laskuun mukaan, eri osia on yhteensä 45 kpl. Tuosta 21 eri osasta 5 kuuluu A-komponentteihin, jotka Swiftin ja Bookerin (2013, ss. 412–413) mukaan ovat tuotteen toiminnan kannalta välttämättömiä. Loput 16 osaa kuuluvat B-komponentteihin, jotka voidaan poistaa tai yhdistää välttämättömiin osiin.

Saatujen A- ja B-komponenttien lukumäärän perusteella lasketaan tuotteen suunnittelutehokkuus E. Laskennassa käytetään Swiftin ja Bookerin (2013, s. 413) esittämää kaavaa, joka on esitettyä tämän työn luvussa 2.3.2.

$$E = \left(\frac{A}{A + B} \right) * 100 \% = \left(\frac{5}{5 + 16} \right) * 100 \% \approx 24 \%$$

Suunnittelutehokkuuden E arvoksi saadaan 24 %. Arvo on huono, sillä Swiftin ja Bookerin (2013, s. 413) mukaan hyvän suunnittelun rajana pidetään 60 %. Tämä on ollut yrityksen ja etenkin kokoonpanoasentajien tiedossa. Sen seurauksena tähän halutaan nyt puuttua. Robotiikkaa ajatellen tuotteen kokoonpantavuutta on välttämätöntä parantaa. Nykyisellä rakenteella tuotteen kokoonpanoa ei ole kannattavaa lähteä automatisoimaan.

Ennen tämän tutkimustyön aloitusta analysoinnin kohteena oleva generaattori X oli yrityksen suurimennekkisin generaattori. Työn aikana tämän generaattorin kysyntä on jonkin verran hiipunut. Suurimennekkisimmäksi generaattoriksi on kerätyn datan perusteella noussut eräs toinen generaattorimalli. Tästä seuraten robotiikkaa lähdetään ensin suunnittelemaan tämän toisen mallin generaattorin kokoonpanoon. Siinä mallissa kokoonpanovaiheet ovat selkeästi analysoinnin kohteena olevaa generaattoria X helpommat toteuttaa manuaalisesti ja siksi myös robotiikkaa hyödyntäen. Menekin muuttuessa generaattorin X rakennemuutokset eivät ole niin kiireellisiä. Manuaalista kokoonpanoa ajatellen generaattorin X rakenteeseen halutaan kuitenkin kokoonpanoa helpottavia ja tehostavia muutoksia.

3.2.3 Generaattorin X rakenteen kehitys

Generaattorin X rakennetta lähdettiin suunnittelemaan uusiksi DFA-menetelmiä hyödyntäen. Formentinin ym. (2022) luvussa 2.3 esiteltujen oppien mukaisesti osia halutaan vähentää ja kriittisiä kokoonpanotehtäviä poistaa. Osia lähdetään poistamaan ruuveista, muttereista ja aluslevyistä. Jotta näistä tarpeettomista osista päästään eroon, on rungossa oltava kierteet. Runkojen kierteitystä varten avattiin yhteistyö runkotoimittajan suuntaan. Yrityksen tavoitteena on saada rungot tulevaisuudessa valmiiksi kierteitettynä.

Toisena keinona alettiin suunnitella osien integroimista. Havaittiin kaksi toteutuskelpoista ideaa: tuki- ja takajalka samoin kuin pistorasiapäätty ja suojakotelo integroidaan toisiinsa. Integrointien seurauksena päästään eroon osasta ruuveista, muttereista ja aluslevyistä. Pistorasiapäädyn ja suojakotelon yhdistäminen poistaa kokoonpanon hitaimman ja haastavimman työvaiheen: erillisen suojakotelon ja pistorasiapäädyn samanaikaisen asennuksen.

Edellä kuvattujen muutosten jälkeen saadaan valmiissa tuotteessa tarvittavien osien lukumääräksi 22 kpl, joista erilaisia osia on 13 kpl. Näistä 5 osaa lukeutuu välttämättömiin A-komponentteihin ja jäljelle jääneet 8 B-komponentteihin. Tällöin suunnittelutehokkuuden uudeksi arvoksi saadaan:

$$E_{uus} = \left(\frac{A}{A+B} \right) * 100 \% = \left(\frac{5}{5+8} \right) * 100 \% \approx 38 \%$$

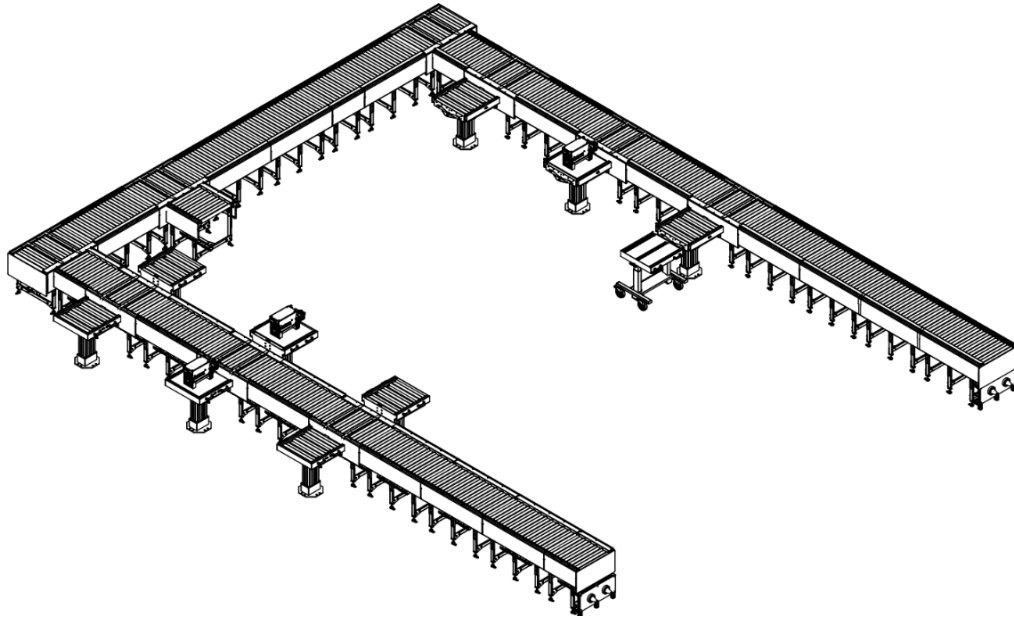
Suunnittelutehokkuuden E arvoksi saadaan 38 %. Suunnittelu ei edellä kuvatuilla muutoksillakaan olisi vielä hyvän arvon (60 %) rajoissa, mutta ainakin päästäisiin eroon kriittisimmästä kokoonpanovaiheesta. Sen seurauksena tuotteen kokoonpano-aika tulee nopeutumaan merkittävästi. Suunniteltujen muutosten myötä 16 osaa kaikista 22 osasta olisi mahdollista asentaa robotilla. Prosentuaalisesti arvo on noin 73 %.

3.3 Kokoonpanolinjan suunnittelu

Yrityksen valmistamien erilaisten tuotteiden määrän perusteella oli selkeää, että linjasta tulee seka- tai monimallilinja. Linjalla tullaan kokoonpanemaan useampaa erilaista tuotetta samanlaisten tuotteiden erissä. Tuote-erien välissä ei tarvitse suorittaa varsinaisia asetustoimenpiteitä, mutta linjan voidaan silti katsoa olevan monimallilinja. Taulukko 1, joka on esitettyinä luvussa 2.2.1 selventää tätä asiaa: esim. vaiheaika vaihtelee tuote-erän mukaan ja toimituksen tulee tapahtua lyhyessä ajassa.

Linjan toimintaperiaatteeksi päätettiin epätahtilinja, jolloin tuotteiden työvaiheet voivat olla eripituiset. Erilaisten tuotteiden runsaan lukumäärän perusteella tämä oli selvä ratkaisu. Kaikkien tuotteiden vaiheaikojen määrittäminen tahtilinjalle sopivaksi olisi ollut todella haastavaa. Epätahtilinjalla avulla tuotantoon saadaan joustavuutta työpisteiden välissä olevien puskurivarastojen avulla. Puskurivarastot eivät kuitenkaan poista linjan tasapainotuksen tärkeyttä, sillä kuten Boysen ym. (2008) mainitsevat, puskurivarastoilla voidaan kompensoida vain tilapäisiä eroavaisuuksia työpisteiden työajoissa. Muuten puskurivarastojen kapasiteetit täyttyvät ja ne menettävät merkityksensä. Linja on asynkroninen järjestelmä, jolloin tuotteet voidaan siirtää työpisteiltä eri aikoihin, sitä mukaan, kun työpisteellä tehtävät saadaan suoritettua.

Linjalle oli varattu tila yrityksen layout suunnitelmassa, joka määritteli paljon linjan layout suunnittelua. Tämä vaikutti osaltaan linjan työpisteiden lukumäärän määrittämiseen. Lopullinen työpisteiden määrä perustui yrityksen strategiassa kuvattuun kasvutavoitteeseen. Kasvutavoitteeseen perustuen määritettiin tuotantokapasiteetti, johon linjan tulee pystyä vastaamaan. Tuotteiden analysoinnin pohjalta saatujen vaiheaikojen sekä halutun tuotantokapasiteetin perusteella linjan työpisteiden lukumääräksi laskettiin 3x2 kpl. Linja tulee olemaan sarjamallinen, jossa kunkin 3 sarjassa olevan työpisteen rinnalla on toinen työpiste suorittamassa samoja työvaiheita. Kuva 20 havainnollistaa linjan suunnitelmaa. Yritys ei halua julkaista edellä kuvattuja laskelmia, joten niitä ei esitetä tässä tutkimustyössä.



Kuva 20. Linjan hahmotelma.

Kuva 20 sisältää kokoonpanolinjan lisäksi hahmotelman testaamon linjasta. Kokoonpanolinjan (linjan vasemmanpuoleinen osuus) jälkeen tuotteet jatkavat horisontaalista linjaa pitkin testaamon linjaan (linjan oikeanpuoleinen osuus), jossa kullekin tuotteelle suoritetaan koeajo. Testaamossa on koeajon suorittamiseen 3 työpistettä. Kuvaan ei ole hahmoteltu seinää, joka tulee erottamaan kokoonpanolinjan testaamon linjasta. Testaamon linja ei varsinaisesti sisälly tähän työhön, mutta se esitellään kokonaiskuvan hahmottamiseksi.

Kokoonpanolinjan suunnittelun eri vaiheissa osallistettiin yrityksen työntekijöitä osastoilta, jotka liittyvät linjan rajapintoihin. Heitä ovat sähköosaston kokoonpanoasentajat ja testaajat, tuotesuunnittelijat, työnjohtajat sekä logistiikkahenkilöstö. Linjaa yhteiskeitettiin heidän kanssaan workshopeissa. Näin varmistettiin työntekijöiden tietämyksen huomioon ottaminen suunnittelussa Rekiekin ja Delchambren (2006, s. 10) ohjeiden mukaisesti. Workshopien tarkoituksena oli luvussa 2.1.1 Elbertin (2013, ss. 9–11) mainitsemien lean-käsitteiden periaatteiden mukaisesti hukan aiheuttajan eliminointi. Tässä tapauksessa käyttämättömän luovuuden, jos työntekijöiden ideoita, taitoja ja oppimista ei hyödynnetä.

Linjan tarkoituksena on tehostaa yrityksen valmistusprosessia. Yksi lean-filosofian mukainen keino valmistuksen tehostamiseen on hukan, eli lisäarvoa tuottamattomien kustannusten eliminointi. Linjamainen ratkaisu poistaa tai ainakin vähentää hukan aiheuttajista tarpeettomat varastot, materiaalin tarpeettoman liikuttamisen, virheellisen käsittelyn ja tarpeettoman liikkeen työskentelyssä.

Linjan toimittajayritykseksi valikoitui IT-Line, jonka kanssa tehtiin paljon yhteistyötä linjan suunnitteluun liittyen. IT-Line vastasi linjan teknisestä toteutuksesta. Toimittajayrityksenä IT-Line oli vastuussa siitä, että linja täyttää konedirektiivin (2006/42/EY) tuotantolinjoille asettamat vaatimukset turvallisuuteen ja toimintaan liittyen.

3.3.1 Kokoonpanolinjan vaiheistus ja tasapainotus

Luvussa 3.2 suoritetun työntutkimuksen ja tuotteiden analysoinnin perusteella suunniteltiin tuotteiden kokoonpanovaiheiden tasainen jakaminen työpisteiden kesken. Haasteelliseksi tasapainottamisen teki tuotteiden runsas lukumäärä erilaisine variaatioineen. Linjalla kokoonpantavat kaksi ns. tuoteperhettä: generaattorit ja magneettigeneraattorit eroavat rakenteeltaan toisistaan jonkin verran. Magneettigeneraattoreihin asennetaan aina erillinen keskus ja CMG-malleissa myös paineakku. Kaikissa tuotteissa on samat pääkomponentit, mutta erilliset lisävarusteet vaikuttavat kokoonpanojärjestykseen ja kokoonpano-aikaan.

Vaiheistuksesta haluttiin tehdä mahdollisimman yksinkertainen. Samojen komponenttien kokoonpano sijoitettiin jokaisella tuotteella samaan vaiheeseen. Tällä tavoin helpotetaan kokoonpanijan työtä. Myös työkaluinvestoinneissa säästettiin, kun kullakin työpisteellä tarvittavat työkalut saatiin minimiin. Samoin työpisteiden materiaalihyllyt saatiin mahdollisimman kompakteiksi kullakin pisteellä, kun tarvittavat materiaalit minimoitiin.

Tasapainotus toteutettiin tuote kerrallaan. Kokoonpanovaiheet jaettiin mahdollisimman tasaisesti kolmelle työpisteelle. Tasapainotuksesta teki haastavan edellisessä kappaleessa mainittu eri tuotteiden samankaltaisten komponenttien kokoonpano samoissa vaiheissa. Tässä tapauksessa vaiheistuksen yksinkertaistaminen meni tasapainotuksen edelle. Työpisteiden välissä olevilla puskurivarastoilla pystytään kompensoimaan tasapainotuksessa ilmenneitä eroja työpisteiden tahtiajoissa. Tuotteiden vaiheajojen ja tahtiajojen määritykset jätetään pois tästä tutkimustyöstä, sillä yritys ei halua julkistaa näitä tietoja.

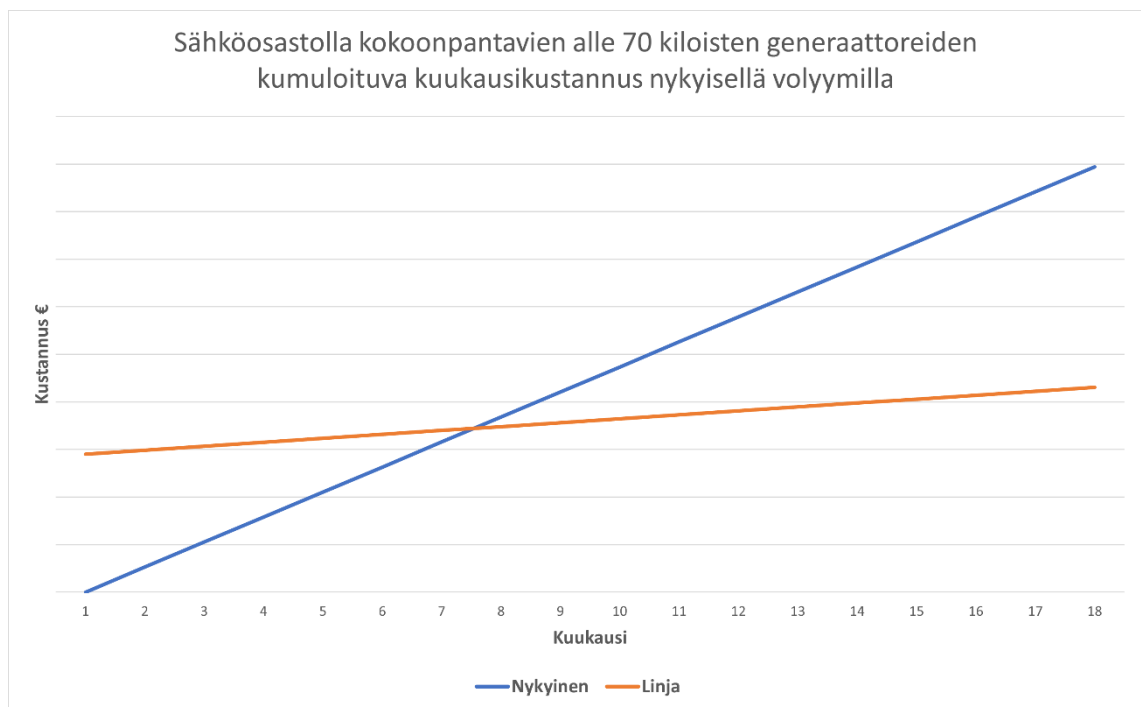
3.3.2 Kokoonpanolinjan takaisinmaksuaika

Linjalle laskettiin takaisinmaksuaika perustuen kokoonpanoprosessin tehostumiseen. Laskelmissa tuotteiden nykyisen kokoonpanoprosessin vaiheisiin kuluvat ajat otettiin yrityksen ERP-järjestelmästä. Kunkin tuotteen kohdalla kokoonpanoajaksi määritettiin keskiarvo edellisen vuoden kokoonpanoajoista. Keskiarvoa määritettäessä selkeät poikkeavuudet jätettiin huomiotta. Linjalla suoritettaviin kokoonpanovaiheisiin kuluvat kokoonpanoajat arvioitiin suorittamalla tuotteille kokoonpanot simuloitussa linjan työpisteessä. Kokoonpanotyö suoritettiin Stephensin (2019, s. 43) standardiajan

määrityksen mukaisesti siten, että työn suorittaa pätevä ja kokenut työntekijä, työ suoritetaan normaalilla tahdilla ja kyseessä on tarkkaan määritelty tehtävä. Ajanpuutteen vuoksi kunkin tuotteen kokoonpanoaika kelloitettiin ainoastaan kertaalleen. Otannan suppeus tiedostettiin ja hyväksyttiin.

Takaisinmaksulaskelmaa varten tarvittiin dataa edellä kuvatun kokoonpanoaikojen muutoksen lisäksi tuotteiden volyymista. Volyymi määritettiin ERP-järjestelmästä tiedonkeruuhetkeä edeltävältä vuodelta. Laskelmassa oletettiin tuotteiden volyymin ja siihen perustuen myös nettotuottojen pysyvän vakiona. Tämä ei todellisuudessa pidä paikkaansa, mutta arvio hyväksyttiin riittävän tarkaksi.

Laskelmassa sovellettiin luvussa 2.2.8 esiteltyä Niskasen ja Niskasen (2016, s. 320) laskukaavaa investoinnin takaisinmaksun laskemiseksi. Laskelman perusteella saatiin kokoonpanolinjan maksavan itsensä takaisin noin 7 kuukaudessa (Kuva 21). Yritys ei halua julkaista laskelman kustannuksia, joten ne salataan.

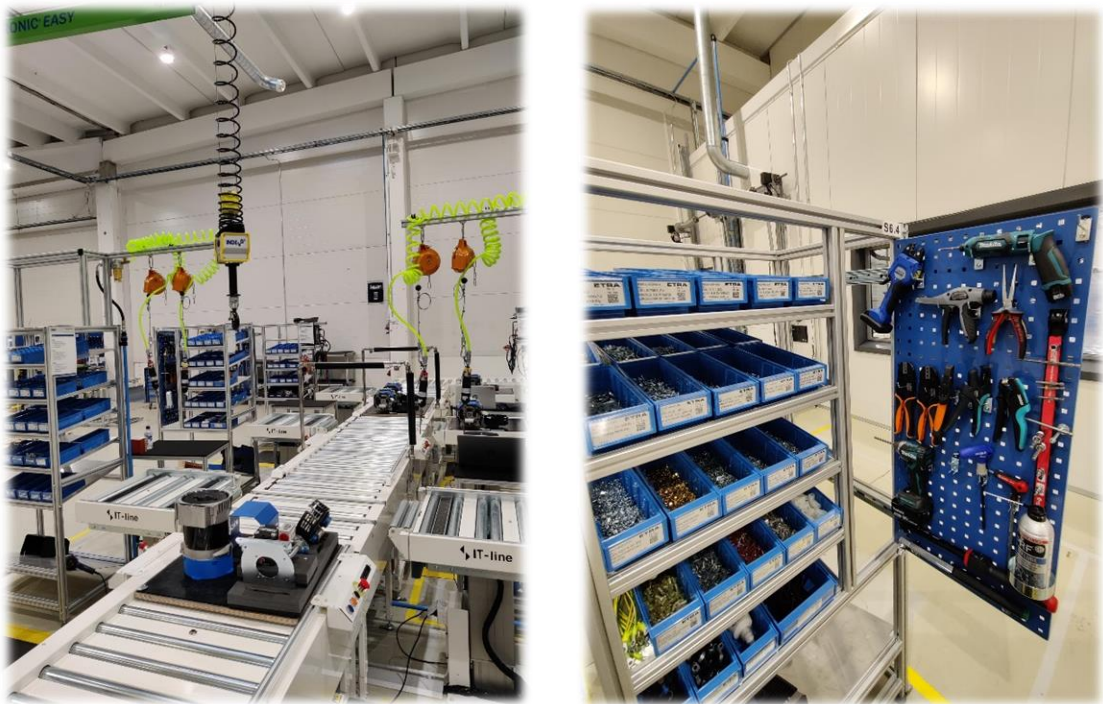


Kuva 21. Kuvaaja linjatyyllisen ja nykyisen kokoonpanoprosessin mukaisista kuukausikustannuksista.

Kuvaajasta havaitaan, että takaisinmaksuajaksi saadaan noin 7 kuukautta. 7 kuukauden jälkeen linjan hankintakustannukset sekä linjatyyllisestä kokoonpanosta aiheutuneet kustannukset alittavat nykyisestä kokoonpanoprosessista aiheutuneet kustannukset.

4. TULOKSET

Tämän tutkimustyön tuloksena kehitettiin teettäjäyrityksen sähköosastolle uusi kokoonpanolinja. Linjalla pystytään työn alussa asetettujen tavoitteiden mukaisesti kokoonpanemaan kaikki alle 70 kg painavat generaattorit ja magneettigeneraattorit. Kokoonpanoprosessista saatiin selvästi aiempaa virtaviivaisempi: materiaalivirta on selkeää, tuotantotilanne näkyvä ja kokoonpano standardisoitua. Yrityksessä jo käytössä ollut lean-menetelmää 5S jatkettiin uudella linjalla. Linjan myötä kokoonpanoprosessissa ollut hukkaa, enimmäkseen materiaalin tarpeetonta liikuttamista, onnistuttiin vähentämään. Linjaratkaisun seurauksena arvoa tuottava työ onnistuttiin selkeämmin eriyttämään muusta toiminnasta. Kaikki edellä kuvatut asiat ovat omiaan helpottamaan sähköosaston päivittäistä johtamista. Kuva 22 esittää valmiin linjaratkaisun sekä työpisteen yhdistetyn materiaali- ja työkaluhyllyn.



Kuva 22. Valmis kokoonpanolinja ja työpisteen yhdistetty materiaali- ja työkaluhylly.

Kokoonpanolinjan myötä tuotteiden tuotannon läpimenoajat paranivat keskimäärin jopa 78 %. Arvo määriteltiin käyttämällä yrityksen ERP-järjestelmästä ja uudesta linjasta kuukauden ajalta kerättyä dataa. Arvo ei ole täysin luotettava, mutta se on suuntaa antava ja tullaan määrittelemään uudelleen linjan oltua kauemmin käytössä.

Tämän diplomityön ensimmäinen tutkimuskysymys kuului: Millainen kokoonpanolinja soveltuu parhaiten kohdeyrityksen sähköosaston tuotteiden automaatiota tukevaan

kokoonpanoon? Tutkimustyön tuloksena saatiin vastaukseksi linja, jonka toimintaperiaatteena on epätahtilinja asynkronisella järjestelmällä, jolloin tuotteet voidaan siirtää työpisteiltä eri aikoihin. Linja voidaan luokitella siinä kokoonpantavien tuotteiden perusteella vielä monimallilinjaksi. Linjan layout ratkaisuksi valikoitui sarjamallinen linja. Työpisteitä on 3 kappaletta sarjassa, joista kunkin rinnalla on rinnakkainen työpiste. Rinnakkaisilla työpisteillä suoritetaan identtiset työtehtävät. Tällä ratkaisulla varmistetaan, että tuotantokapasiteetti riittää kysynnän kasvaessa. Linjan toimintaa ohjataan ohjelmoitavalla logiikalla, mikä tukee automaation lisäämistä linjalle.

Toinen tutkimuskysymys liittyi linjan tasapainotukseen: Miten linjalla tapahtuvien tuotteiden kokoonpano tulisi vaiheistaa ja tasapainottaa, jotta kokoonpano olisi mahdollisimman kustannustehokasta? Kysymykseen selvitettiin ratkaisua luvuissa 2.2.5 ja 2.2.6 esitettyjen teorioiden sekä tuotteille suoritettujen analysointien perusteella. Kokoonpanovaiheiden tasapainotus linjalla osoittautui haasteelliseksi. Haastavan tasapainotuksesta teki linjalla kokoonpantavien tuotteiden runsas määrä. Kokoonpanosta haluttiin mahdollisimman kustannustehokas onnistuneella tasapainotuksella, mutta selkeä eri tuotteiden samanlaisella vaiheistuksella. Lopputuloksena vaiheistuksesta saatiin selkeä: kokoonpanovaiheet etenevät loogisessa järjestyksessä ja eri tuotteiden samankaltaiset työvaiheet tehdään samoilla työpisteillä. Tasapainotuksesta saatiin toimiva: linjan puskurivarastot riittävät kompensoimaan vaiheajoeroeroavaisuuksia ja kaikkien tuotteiden kohdalla vaiheajat ovat alle kyseisenä vuonna määritettyjen tahtiaikojen. Tahtiaikojen alitus varmistaa, että asiakaskysyntään pystytään vastaamaan. Tasapainotuksessa on kuitenkin hyvä jatkokehityskohde. Paremman tasapainotuksen myötä linjan toiminta saadaan mahdollisimman kustannustehokkaaksi, varmistetaan työvoiman tehokkaampi käyttö ja lyhyemmät valmistusajat.

Kolmannen tutkimuskysymyksen tarkoituksena oli perehtyä kohdeyrityksen valmistaman generaattorin X rakenteeseen. Miten generaattorin X nykyistä rakennetta tulisi muuttaa menetelmää DFA hyödyntäen siten, että generaattorin kokoonpanon vaiheista 80 % pystytään automatisoimaan? Ongelmaa selvitettiin DFA-menetelmien näkökulmasta. Generaattorille X suoritettiin toiminnallinen analyysi, jonka perusteella generaattorin suunnittelutehokkuudeksi saatiin ainoastaan 24 %. Hyvän rajan ollessa 60 % havaitaan, että rakenteessa on kehitettävää. Suunnittelutehokkuuden huonouden selittää kokoonpanossa tarvittava runsas ruuvien, muttereiden ja aluslevyjen määrä. Luvussa 3.2.3 esitetyt rakenteen suunnittelumuutokset tuki- ja takajalan sekä pistorasiapäädyn ja suojakotelon integroimiseksi vähentäisivät generaattorin kokoonpanossa tarvittavien osien lukumäärän 45 osasta 22 osaan, eli noin 50 %. Muutoksilla

suunnittelutehokkuuden arvoksi saataisiin 38 %. Silloinkaan rakenne ei olisi hyvän suunnittelun rajoissa, mutta tuotteen kokoonpano nopeutuisi haastavimman kokoonpanovaiheen sekä useiden ruuvien, muttereiden ja aluslevyjen jäämisellä pois. Tällöin noin 73 % kokoonpanon vaiheista pystyttäisiin automatisoimaan, esim. robotilla tai cobotilla toteutettavaksi. Aivan 80 % automaatioasteen tavoitteeseen ei edellä kuvatuilla muutoksilla päästä, mutta kokoonpantavuus paranisi selvästi.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET JA KEHITYSEHDOTUKSET

Eskelinen ja Karsikas (2014, ss. 165–168) mainitsevat pohdinta osion olevan yksi suomalaisen tieteellisen tutkimuksen heikoista lenkeistä. Heidän näkemyksensä mukaan pohdintaluku on suomalaisessa tutkimuksessa useimmiten lyhyt, tiivistelmänomainen lopputoteama. Kun he kokevat sen olevan tärkein osa tieteellistä tutkimusta. Pohdintaluvun avulla autetaan toisia tutkijoita ymmärtämään saatuja tuloksia vertailemalla ja yhdistämällä tulokset laajempaan kokonaisuuteen. Tämä diplomityö ei varsinaisesti ole tieteellinen tutkimus, mutta silti tästä osiosta pyritään tekemään laaja, kattava ja kantaottava.

5.1 Tulosten yleistettävyyden

Tämä tutkimustyö keskittyi yrityksen sisäiseen kehitykseen. Siksi työssä esitetyt tulokset: kehitetty linjaratkaisu vaiheistuksineen ja generaattorin rakenteen suunnittelumuutokset eivät ole sellaisenaan yleistettävissä muihin tutkimuksiin. Teoria, joiden pohjalta tämän työn tulokset on johdettu, on kuitenkin yleispätevää ja käytettävissä muihin samankaltaisiin tutkimusongelmiin. Työtä lähestyttiin tuotannon tehostamisen viitekehiksestä. Tarkoituksena oli kehittää kokoonpanoprosessia: tapoja, menetelmiä ja tuotteita.

Tässä työssä kyse oli enemmänkin tuotekehityksestä tai tuotesuunnittelusta kuin tieteellisestä tutkimustyöstä. Eskelinen ja Karsikas (2014, s. 168) huomauttavatkin, että laite, kone, ohjelmisto, järjestelmä tai ylipäätään mikään tuote ei voi olla tieteellistä ”uutta” tietoa. He kertovat näissäkin tapauksissa tulosten hyödynnettävyyden olevan kunnossa, sillä tuotekehitysprojektin tuloksena saadulla uudella tuotteella tai versiolla on usein asiakasjoukko odottamassa tuotteen markkinoille pääsyä. Tässä työssä uutena tuotteena voidaan pitää linjaa ja kohdeasiakkaana yrityksen sähköosaston työnjohtajaa ja työntekijöitä. Asiakasryhmään voidaan katsoa kuuluvaksi myös varsinaiset yrityksen asiakkaat, jotka ostavat linjalla valmistettavia tuotteita. Yrityksen strategian asiakaslähtöisyyteen pohjautuen linjan myötä asiakkaat saavat laadukkaampia tuotteita nopeammin.

5.2 Tulosten luotettavuus

Työn aikana onnistuttiin hyvin noudattamaan Eskelisen ja Karsikkaan (2014, s. 168) mainitsemaa tiedeyhteisön arvostamaa tutkimuksellisen työotteen periaatetta, johdonmukaista suunnittelumetodien käyttöä. Työ aloitettiin perehtymällä tarvittavaan teoriaan, jonka jälkeen aloitettiin varsinainen suunnittelutyö. Suoritettiin nykytilanteen kartoitus analysoimalla nykyinen kokoonpanoprosessi ja tuotteet. Analysointien pohjalta päädyttiin linjan valintaan ja vaiheistukseen. Lopputuloksena saatiin toimiva linjaratkaisu toimintaohjeineen. Edellä kuvattujen vaiheiden lomassa kartoitettiin generaattorimallin X rakenteen kehittämistä DFA-periaatteiden näkökulmasta.

Kokoonpanolinjan kohdalla tämä työ onnistui hyvin: kokoonpanoprosessi tehostui huomattavasti. Tulokset-luvussa esitetty arvo, jonka mukaan tuotteiden läpimenoajat tuotannossa paranivat noin 78 % riittää perustelemaan tämän väittämän. Luvun todenmukaisuutta on kuitenkin kyseenalaistettava. Luvun määrittelyssä käytetyt ns. vanhan kokoonpanoprosessin kokoonpanoajat ovat peräisin yrityksen ERP-järjestelmästä, ne eivät ole luotettavin työntutkimusmenetelmin kellotettuja. Ajoissa on varmasti inhimillisiä leimausvirheitä: on esim. unohdettu leimata työ suoritetuksi. Virhemarginaalia aiheuttaa myös linjalta mitattujen kokoonpanoaikojen otannan suppeus. Vaikka 78 % parannus sisältää jonkin verran virhemarginaalia, on se joka tapauksessa suuntaa antava ja kuvastaa, että yhtenä tämän työn tarkoituksena ollut sähköosaston tuotannon tehostaminen onnistui hyvin.

Toteutettaessa generaattorille X tämän työn luvussa 3.2.3 esitetyt rakenteen suunnittelumuutokset, pystytään 73 % kokoonpanon vaiheista automatisoimaan. 73 % on arvio, eikä perustu simuloinnilla tai muulla luotettavalla tavalla todistettuun menetelmään. Varmasti kaikki vaiheet olisivat automatisoitavissa, mikäli ei olisi kustannuksiin tai aikatauluun liittyviä rajoitteita. Automaatiota tukevia muutoksia suunniteltaessa tulee kuitenkin aina miettiä sijoitettavien kustannusten tuoma hyöty, sillä automaatio voi olla kallista toteuttaa. 73 % arvio perustuu yksinkertaisin menetelmin toteutettuihin automaatoratkaisuihin. Työn alkuperäisenä tavoitteena oli, että 80 % kokoonpanon vaiheista pystytään automatisoimaan. Tavoitteeseen ei aivan päästy, mutta tavoitteen taustalla ollut kokoonpanon yksinkertaistaminen suunnitelluilla muutoksilla onnistuu. Osien lukumäärä vähenisi noin 50 % nykyisestä.

5.3 Työn tutkimuskysymykset

Tämän diplomityön tutkimuskysymykset olivat hyvin aseteltuja: Kysymykset olivat yksityiskohtaisia ja loivat johdonmukaisen rakenteen tälle työlle. Kaikkiin kysymyksiin on esitetty vastaukset Tulokset-luvussa. Ensimmäinen, kokoonpanolinjan valintaan liittyvä tutkimuskysymys, oli tärkein ja loi perustan tälle tutkimustyölle. Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen saatiinkin selkeä ja perusteltu vastaus.

Toinen, linjan tasapainotusta käsittelevä kysymys, osoittautui monimutkaisemmaksi. Kysymyksen tavoitteena oli saada linjalla tapahtuvasta kokoonpanosta mahdollisimman kustannustehokas. Työn aikana havaittiin, että vaiheistuksen selkeyden ja optimaalisen tasapainotuksen välillä on tehtävä kompromissi. Vaiheistuksen selkeys yksinkertaistaa ja sitä kautta tehostaa eri tuotteiden kokoonpanoa linjalla. Vaiheistuksen selkeyttäminen teki tasapainotuksen kannalta kustannustehokkaimmasta ratkaisusta mahdollottoman. Toisen tutkimuskysymyksen vastauksessa riittääkin pohdittavaa jatkossa. Vaiheiden työkuormaa seurataan linjan käyttöönoton jälkeen ja tarvittaessa tehdään muutoksia.

Kolmannen tutkimuskysymyksen myötä perehdyttiin tarkemmin generaattorin X rakenteeseen. Rakennetta analysoitaessa ei ollut tarkoituksena arvioida suunnittelijan tekemää työtä. Tarkoituksena oli etsiä nykyisestä rakenteesta kehitettäviä kohtia, joita muuttamalla voidaan lisätä automaatiota kyseisen tuotteen kokoonpanoon. Koska kysymys sisälsi tarkan automaatioasteen (80 %) tavoitteen, työssä ei onnistuttu täydellistä vastausta antamaan. Kysymyksen asettelun myötä tähän tutkimustyöhön saatiin luontevasti sisällytettyä DFA-näkökulma.

5.4 Käytetyn aineiston arviointi

Diplomityön pohjana käytettyä teorian materiaalia voidaan pitää luotettavana. Enimmäkseen tietoihin löydettiin vertaisarvioituja julkaisuja Andor-hakupalvelusta. Mikäli tietoa ei löytynyt vertaisarvioituna, sen paikkansapitävyys pyrittiin toteamaan varmistamalla tieto useammasta lähteestä. Linjan tuotannon tehostumisen ja takaisinmaksun laskelmissa käytettyjen kokoonpanoaikojen luotettavuutta olisi voitu parantaa kasvattamalla otosten määrää. Kerätyn datan määrään tyydyttiin, jotta saadaan edes suuntaa antavia tuloksia. Linjan myötä saavutetun tuotannon tehostumisen tarkempi määrittäminen on hyvä pidemmän aikavälin seurantakohde.

Työn tuotekohtaiset analyysit yms. eivät sellaisenaan ole käytettävissä muihin tuotteisiin. Näiden taustalla olevia menetelmiä voidaan kuitenkin käyttää vastaavanlaisiin suunnittelu-/kehityshankkeisiin, tällä tavoin työ on yleistettävissä. Teoriaosuudessa

kuvattuja menetelmiä ja tietoja voidaan pitää relevanttina työn kannalta. Tietoja tarvittiin, jotta varmistettiin riittävä tietämys sekä oikeiden menetelmien käyttäminen. Työn kirjallisuuskatsauksessa esitettyä tietoa pystyttiin hyvin hyödyntämään varsinaisessa suunnittelutyössä.

5.5 Kehitysehdotukset

Linjamainen ratkaisu on erinomainen ratkaisu tehokkuuden kannalta, mutta työn mielekkyyttä ajatellen ei ehkä paras ratkaisu. Työntekijöiden viihtyvyyttä ajatellen tulee huomioida kokoonpanotyön monotonisuus. Tässä asiassa työntekijöitä on hyvä kuunnella ja esim. vaihdella työtehtäviä, jotta työn mielekkyys säilyy. Työntekijöiden mielipiteiden huomioimiseksi linjalle lisättiin kehitystaulu, jonne työntekijät voivat nimettömästi kirjata linjalla havaitsemiaan puutteita tai kehitysehdotuksia. Luvussa 2.1.1 Radin Umar ym. (2023) sisällyttävät leanin kolmeen hukan aiheuttajaan ergonomian näkökulman: ihmisen energian tuhlaus, epätasainen työtaakan jakautuminen, työntekijöiden fyysinen ja henkinen ylikuormitus sekä työntekijöiden suoritustason vaikutus työn suoritukseen. Linjamaisella kokoonpanolla ihmisen energian tuhlauksen ja epätasaisen työtaakan jakautumisen ei pitäisi aiheuttaa ongelmia. Ergonomian merkitys tulee kuitenkin korostumaan työn ollessa toistuvaa. Kohdeyrityksessä ergonomia on hyvin huomioituna ja samaa jatkettiin uuden linjan kohdalla. Esimerkiksi usein käytetyille ja raskaimmille työkaluille hankittiin keventimet, työpisteille ergonomiset työpistematot sekä työpisteet valittiin korkeussäädettäviksi. Ergonomiaa parantavia tuotteita kehitetään jatkuvasti, linjan ergonomian kehitys onkin jatkuva kehityskohde.

Hyvinä jatkokehitystoimina on varsinainen robotiikan ja automaation tuominen linjalle ja kokoonpanoprosessiin. Robotiikan tuomiseksi generaattoreiden kokoonpanoon on jo käynnistetty hankkeita. Suunniteltu linja mahdollistaa automaation tuomisen myös logistiikkaan. Nykyinen logistiikkatyöntekijöiden toimesta tapahtuva linjan syöttäminen voisi tapahtua autonomisten mobiilirobottien toimesta. Linjan päähän voisi kehittää esim. MiR-robotille sopivan telakoinnin.

Linjan tasapainotukseen liittyen luvussa 2.2.6 esitettyä sekvensointia voisi hyödyntää linjalla paremmin. Kohdeyrityksessä kyseeseen voisi tulla sekamallisekvensointi. Työnsuunnittelun kautta voitaisiin paremmin välttää tuotannon ylikuormitustilanteet yksityiskohtaisen tuotantosuunnitelman avulla. Sekvensointiin liittyen aiemmin mainitussa linjan tasapainotuksessa riittää kehitettävää, jotta linjasta saadaan mahdollisimman kustannustehokas.

Sähkölaitelinjan lisäämä tehokkuus sai yrityksen käynnistämään uuden projektin kokoonpanolinjan suunnittelemiseksi myös mekaniikkaosastolle. Tämä tutkimustyö tarjoaa kattavan pohjan uusien linjojen suunnittelemiseksi.

LÄHTEET

Ahokas, P., Tiihonen, J., Neuvonen, J., & Sulkki, M. (2011). *Työntutkimuksen käsitteitä, menettelytapoja ja käyttökohteita*. EK-SAK tuottavuustyöryhmä. https://teknologiainfo.net/sites/teknologiainfo.net/files/download/Tyontutkimuksen_kasitt_eita_ebook.pdf

Bard, J. F., Shtub, A., & Joshi, S. B. (1994). Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length. *International journal of production research*, 32(10), 2431–2454. <https://doi.org/10.1080/00207549408957076>

Battini, D., Faccio, M., Persona, A., & Sgarbossa, F. (2009). Balancing–sequencing procedure for a mixed model assembly system in case of finite buffer capacity. *International journal of advanced manufacturing technology*, 44(3–4), 345–359. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1823-8>

Baudin, M. (2020). *Lean Assembly: The Nuts and Bolts of Making Assembly Operations Flow*. Taylor and Francis.

Baybars, I. (1986). A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *Management science*, 32(8), 909–932. <https://doi.org/10.1287/mnsc.32.8.909>

Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European journal of operational research*, 168(3), 694–715. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023>

Becker, C., & Scholl, A. (2009). Balancing assembly lines with variable parallel workplaces: Problem definition and effective solution procedure. *European journal of operational research*, 199(2), 359–374. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.11.051>

Boothroyd, G. (2005). *Assembly automation and product design* (2nd ed.). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781420027358>

Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly* (3rd edition.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420089288>

Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European journal of operational research*, 183(2), 674–693. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010>

Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111(2), 509–528. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.026>

Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European journal of operational research*, 192(2), 349–373. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.09.013>

Bravo-Paliz, J. S., & Avilés-Sacoto, S. V. (2023). Characterizing the integration of BRC food safety certification and lean tools: The case of an Ecuadorian packaging company. *TQM journal*, 35(4), 872–892. <https://doi.org/10.1108/TQM-05-2021-0120>

Cory Bronger & Robert Corbitt. (2021). *The Four Philosophies of Lean*. Productivity Press.

De Lit, P., Rekiek, B., Pellichero, F., Delchambre, A., Danloy, J.-F., Petit, F., Leroy, A., Maree, J.-F., Spineux, A., & Raucant, B. (1999). A new philosophy for the design of a product and its assembly line. *ISATP*, 381–386. <https://doi.org/10.1109/ISATP.1999.782988>

Dynaset. (2024). *Dynaset—Company Presentation-2024*. Sisäinen julkaisu. Saatavissa (viitattu 20.8.2024): https://dynaset.sharepoint.com/:p:/r/_layouts/15/Doc.aspx?sourcedoc=%7B2FB7BFFD-63AA-4EFB-8839-8E5978A5505F%7D&file=DYNASET%20Company%20Presentation%202024.pptx&action=edit&mobileredirect=true&wdsle=0

Elbert, Mike. (2013). *Lean production for the small company*. CRC Press.

Emde, S., Boysen, N., & Scholl, A. (2010). Balancing mixed-model assembly lines: A computational evaluation of objectives to smoothen workload. *International journal of production research*, 48(11), 3173–3191. <https://doi.org/10.1080/00207540902810577>

Eskelinen, H., & Karsikas, S. (2014). *Tutkimusmetodiikan perusteet* (1. painos). Tammertekniikka.

Formentini, G., Boix Rodríguez, N., & Favi, C. (2022). Design for manufacturing and assembly methods in the product development process of mechanical products: A systematic literature review. *International journal of advanced manufacturing technology*, 120(7–8), 4307–4334. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08837-6>

- Ghirann, G. (2017). *Basics of self-balancing processes: True lean continuous flow*. (1st edition). CRC Press.
- Grzechca, W. (2011). *Assembly line: Theory and practice*. IntechOpen.
- Guerriero, F., & Miltenburg, J. (2003). The stochastic U-line balancing problem. *Naval research logistics*, 50(1), 31–57. <https://doi.org/10.1002/nav.10043>
- Hwang, R., & Katayama, H. (2010). Integrated procedure of balancing and sequencing for mixed-model assembly lines: A multi-objective evolutionary approach. *International journal of production research*, 48(21), 6417–6441. <https://doi.org/10.1080/00207540903289755>
- Jyrkkö, E., & Riistama, V. (2000). *Laskentatoimi päätöksenteon apuna* (18. uud. p). WSOY.
- Kamal Uddin, M., Cavia Soto, M., & Martinez Lastra, J. L. (2010). An integrated approach to mixed-model assembly line balancing and sequencing. *Assembly automation*, 30(2), 164–172. <https://doi.org/10.1108/01445151011029808>
- Laaksonen, S. (1998). Laadullisen tutkimuksen laadun ravistelua. *Aikuiskasvatus*, 18(2), 162–164. <https://doi.org/10.33336/aik.92505>
- Lam, N. T., Toi, L. M., Tuyen, V. T. T., & Hien, D. N. (2016). Lean Line Balancing for an Electronics Assembly Line. *Procedia CIRP*, 40, 437–442. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.089>
- Lapinleimu, I., Kauppinen, V., & Torvinen, S. (1997). *Kone- ja metallituoteteollisuuden tuotantojärjestelmät*. WSOY.
- Liker, J. K. (2021). *The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer* (Second edition.). McGraw-Hill.
- Lv, Y., Tan, Y., Zhong, R., Zhang, P., Wang, J., & Zhang, J. (2022). Deep reinforcement learning-based balancing and sequencing approach for mixed model assembly lines. *IET collaborative intelligent manufacturing*, 4(3), 181–193. <https://doi.org/10.1049/cim2.12061>
- Mann, D. (2010). *Creating a lean culture: Tools to sustain lean conversions* (2nd ed.). Productivity Press, an imprint of Taylor and Francis. <https://doi.org/10.1201/EBK1439811412>

- McMullen, P. R., & Frazier, G. V. (1999). Using Simulation and Data Envelopment Analysis to Compare Assembly Line Balancing Solutions. *Journal of productivity analysis*, 11(2), 149–168. <https://doi.org/10.1023/A:1007732016717>
- Merengo, C., Nava, F., & Pozzetti, A. (1999). Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International journal of production research*, 37(12), 2835–2860. <https://doi.org/10.1080/002075499190545>
- Meyr, H. (2004). Supply chain planning in the German automotive industry. *OR Spectrum*, 26(4), 447–470. <https://doi.org/10.1007/s00291-004-0168-4>
- Miltenburg, J. (2007). Level schedules for mixed-model JIT production lines: Characteristics of the largest instances that can be solved optimally. *International journal of production research*, 45(16), 3555–3577. <https://doi.org/10.1080/00207540701223394>
- Molloy, O., Warman, E. A., & Tilley, S. (2012). *Design for Manufacturing and Assembly: Concepts, architectures and implementation*. Springer.
- Neilimo, Kari., & Uusi-Rauva, Erkki. (2005). *Johdon laskentatoimi* (6. uud. p.). Edita.
- Nicholas, J. (2018). *Lean Production for Competitive Advantage: A Comprehensive Guide to Lean Methodologies and Management Practices, Second Edition* (2. p.). Productivity Press. <https://doi.org/10.4324/9781351139083>
- Niskanen, J., & Niskanen, M. (2016). *Yritysrahoitus*. Edita.
- Pierre De Lit, Delchambre, A., & Henrioud, J.-M. (2003). An integrated approach for product family and assembly system design. *IEEE transactions on robotics and automation*, 19(2), 324–334. <https://doi.org/10.1109/TRA.2003.808853>
- Pil, F. K., & Holweg, M. (2004). Linking Product Variety to Order-Fulfillment Strategies. *Interfaces (Providence)*, 34(5), 394–403. <https://doi.org/10.1287/inte.1040.0092>
- Pintzos, G., Triantafyllou, C., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Chryssolouris, G. (2016). Assembly precedence diagram generation through assembly tiers determination. *International journal of computer integrated manufacturing*, 29(10), 1045–1057. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2015.1130260>
- Protzman, C., Whiton, F., & Kerpchar, J. (2023). *Sustaining lean: Creating a culture of continuous improvement*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003186090>

- Radin Umar, R. Z., Tiong, J. Y., Ahmad, N., & Dahalan, J. (2023). Development of framework integrating ergonomics in Lean's Muda, Muri, and Mura concepts. *Production planning & control, ahead-of-print*(ahead-of-print), 1–9. <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2189640>
- Rekiek, Brahim., & Delchambre, Alain. (2006). *Assembly Line Design The Balancing of Mixed-Model Hybrid Assembly Lines with Genetic Algorithms* (1st ed. 2006.). Springer London. <https://doi.org/10.1007/b138846>
- Rother, M., & Shook, J. (2018). *Learning to see: Value-stream mapping to create value and eliminate muda* (Version 1.5; 20th Anniversary Edition). Lean Enterprise Inst.
- S. Vinodh. (2022). *Lean Manufacturing: Fundamentals, Tools, Approaches, and Industry 4.0 Integration*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003190332>
- Salah Eldein, S. A., & Sobhi, N. (2019). Waste reduction by linear programming optimizing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 610(1), 12079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/610/1/012079>
- Salminen, A. (2011). Mikä kirjallisuuskatsaus? Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyypeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopisto.
- Salveson, M. E. (1955). The Assembly-Line Balancing Problem. *Journal of fluids engineering*, 77(6), 939–947. <https://doi.org/10.1115/1.4014559>
- Simons, D., & Zokaei, K. (2005). Application of lean paradigm in red meat processing. *British food journal* (1966), 107(4), 192–211. <https://doi.org/10.1108/00070700510589495>
- Sorli, M., & Stokic, D. (2009). *Innovating in Product/Process Development: Gaining Pace in New Product Development* (1. Aufl.). Springer Verlag London Limited. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-545-1>
- Steiner, G., & Yeomans, J. S. (1996). Optimal level schedules in mixed-model, multi-level JIT assembly systems with pegging. *European journal of operational research*, 95(1), 38–52. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00254-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00254-5)
- Stephens, M. P. (2019). *Manufacturing facilities design and material handling* (Sixth edition.). Purdue University Press.

Swift, K. G., & Booker, J. D. (2013). *Manufacturing process selection handbook* (1st edition). Elsevier.

Townsend, Beverly. (2012). *The basics of line balancing and JIT kitting* (1st edition). CRC Press.

Ventä, O., Honkatukia, J., Häkkinen, K., Kettunen, O., Niemelä, M., Airaksinen, M., & Vainio, T. (2018, Lokakuu). *Robotisaation ja automatisaation vaikutukset Suomen kansantalouteen 2030*. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta.

Wilson, L. (2015). *How to implement lean manufacturing* (2nd edition.). McGraw-Hill Education LLC.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation* (Rev. and updated, 1. paperback ed). Simon & Schuster.

Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (2007). *The machine that changed the world: The story of lean production - Toyota's secret weapon in the global car wars that is revolutionizing world industry* (1. paperback ed). Free Press.

Yano, C. A., & Rachamadugu, R. (1991). Sequencing to Minimize Work Overload in Assembly Lines with Product Options. *Management science*, 37(5), 572–586. <https://doi.org/10.1287/mnsc.37.5.572>

Zorowski, C. F. (2016). *Design for assembly*. CreateSpace Independent Publishing Platform.