Tampereen yliopisto

Kalle Syrjä

RUUVIYKSIKÖN KOKOONPANTAVUUDEN TARKASTELU JA KOKOONPANON AUTOMATISOITAVUUDEN KEHITTÄMINEN

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Minna Lanz
Tarkastaja: Jyrki Latokartano
Syyskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Kalle Syrjä: Ruuviyksikön kokoonpantavuuden tarkastelu ja kokoonpanon automatisoitavuuden kehittäminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2023

Kokoonpano on usein valmistavassa teollisuudessa osa-alue, jossa manuaalisen työn osuus on suurin. Ihmisten ja teknologian tulee toimia yhteistyössä kokoonpanotyön yksinkertaistamiseksi, sekä tehokkuuden ja tuottavuuden parantamiseksi. Selittävänä tekijänä manuaalisen työn suurelle osuudelle pidetään usein ihmisten joustavuutta, adaptoituvuutta ja luovuutta. Ihminen suoriutuu automaatioita paremmin tuntumaa, sekä luovaa ajattelua vaativissa toimenpiteissä. Automaation etuihin sen sijaan kuuluu sen väsymätön ja tasalaatuinen suorittaminen raskaissa sekä toistuvissa toimenpiteissä. Ihmisen poistaminen vaativista kokoonpanoprosesseista on kompleksista ja sen taloudellinen perustelu on vaikeaa. Vaativissa kokoonpanoprosesseissa tulisi ihmisen poistamisen sijaan keskittyä luomaan ihmisen sekä automaation välille paras mahdollinen työnjako.

Tämä diplomityö keskittyy tarkastelemaan kohdeyritys Gardner Denver Oy:n tiloissa tapahtuvaa Enduro- mallin ruuviyksikön kokoonpanotyötä. Työ tarkastelee kokoonpantavan ruuviyksikön rakennetta, sekä nykyisessä kokoonpanoprosessissa sovellettavia työkaluja, liikkeitä ja kokoonpanometodeja. Tästä kokonaisuudesta arvioidaan sen nykytilanteen kehitettäviä osa-alueita. Kehitettäviä osa-alueita ovat esimerkiksi suunnittelun heikkoudet ja ihmistä tarpeettomasti kuormittavat kokoonpano-operaatiot. Ongelmakohtien arviointi perustuu käyttäjiltä kerättyyn tietoon sekä vertaisarvioiduissa teoksissa esiteltyihin yleisesti tunnistettuihin tapauksiin.

Työn tuloksena on saatu useita eri kategorian tuloksia sekä kehitysehdotuksia. Käyttäjille suoritettu kyselytutkimus antaa käyttäjien näkökulmasta suuntaa tämän hetken haastavimmista tilanteista sekä automaation tarpeesta kokoonpanotyössä. Käyttäjien ilmoittamiin ongelmiin on esiteltynä kirjallisuuden avulla perusteltuja ratkaisuehdotuksia, sekä Autodesk Inventor sovelluksella tehtyjä malleja suunnittelumuutoksista ja prototyyppityökalusta. Lyöntioperaatiot eivät ole suositeltavia automaation eivätkä ihmisten kannalta. Tästä syystä laakereiden sisäkoolien prässäämiseen roottoreille tarvittava voima on laskettu ja tulokset esitetty. Vastaavat tulokset ovat nähtävissä myös laakereiden prässäämisestä laakeripesiin.

Avainsanat: Kokoonpantavuus, Automatisoitavuus, DFA, Ergonomia

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Kalle Syrjä: Examining the assembleability of the screw unit and developing the automation of the assembly
Master's Thesis
Tampere University
Master's Degree Program in Mechanical Engineering
September 2023

Assembly is often the area in the manufacturing industry where the share of manual work is the largest. People and technology must work together to simplify assembly work and improve efficiency and productivity. People's flexibility, adaptability and creativity are often considered to be an explanatory factor for the large share of manual work. Humans perform better than automation in procedures that require feeling and creative thinking. The advantages of automation, on the other hand, include its tireless and consistent performance in heavy and repetitive procedures. Removing humans from demanding assembly processes is complex and its economic justification is difficult. In demanding assembly processes, instead of eliminating humans, the focus should be on creating the best possible division of labor between humans and automation.

This thesis focuses on examining the assembly work of the screw unit of the Enduro model that takes place in the premises of the target company Gardner Denver Oy. The work examines the structure of the screw unit to be assembled, as well as the tools, movements and assembly methods applied in the current assembly process. From this whole, the aspects of its current situation that need to be developed are evaluated. Areas that need to be developed are, for example, design weaknesses and assembly operations that burden people unnecessarily. The assessment of problem areas is based on information collected from users and commonly recognized cases presented in peer-reviewed works.

As a result of the work, several results of different categories and development proposals have been obtained. The survey conducted for users gives direction from the users' point of view about the most challenging situations at the moment and the need for automation in assembly work. Solutions to the problems reported by the users are presented, substantiated with the help of literature, as well as models of design changes and the prototype tool made with the Autodesk Inventor application. Strike operations are not recommended for automation or humans. For this reason, the force required to press the inner cores of the bearings onto the rotors has been calculated and the results presented. Corresponding results can also be seen from pressing the bearings into the bearing housings.

Keywords: Assembleability, Automability, DFA, Ergonomics

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

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
1.1 Yritysesittely 2
1.2 Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät 3
2. SUUNNITTELU KOKOONPANTAVUUDEN NÄKÖKULMASTA 5
2.1 Menetelmien määrittely 5
2.2 Menetelmien taloudellinen motiivi 7
2.3 DFA ohjeistus ja tavoitteet 8
2.4 Kokoonpantavuuden analysointityökaluja 9
2.4.1 Boothroyd-Dewhurst 10
2.4.2 Lucas DFA 11
2.4.3 Hitachi 13
2.5 Tarkistuslista 15
2.6 Manuaalisen vs. automaattisen kokoonpanon tarkastelu 15
3. KOKOONPANOTYÖN ERGONOMIA 17
3.1. Tuotantovaatimusten vaikutus työolosuhteisiin 18
3.2 Ergonomia ja tuottavuus 19
3.3 Ergonomian ja laadun yhteys 20
3.4 Teknologian ja ergonomian yhdistäminen kokoonpanotyössä 21
4. AUTOMATISOITAVUUS 26
4.1 Syitä automatisoinnille 26
4.2 Automaation taso 28
4.3 Tuotteen suunnittelu robotisoituun kokoonpanoon 29
4.3.1 Layoutin vaikutus kokoonpanon suunnitteluun 30
4.3.2 Vikaantumisten määrä 30
4.3.3 Orientointi ja syöttö 31
4.3.4 Kokoonpanoliikkeet 32
4.3.5 Asettaminen ja kiinnitys 32
5. KOKEELLINEN OSUUS 34
5.1 Nykytilanne kokoonpanossa 34
5.2 Selvitys työergonomiasta ja työolosuhteista 36
5.3 Kokoonpantavuuden tarkastelu 40
5.4 Kokoonpantavuustarkastelun suorittaminen 43
5.4.1 Kappaleiden purseet 45
5.4.2 Runko 45
5.4.3 Jousisokat 47
5.4.4 Tulpat 50
5.4.5 Painelaippa 51
5.4.6 Roottorit ja laakerikoolit 51
5.4.7 Akselimutterit 53
5.4.8 Tiivistekansi ja akselitiiviste 56

5.4.9 Tiivisteet 58
5.4.10 Tunnistekilpi ja ahtoniitit 58
5.4.11 Laakerit 58
6. TULOKSET 61
6.1 Kyselytutkimuksen tulokset 61
6.2 Kokoonpantavuuden tarkastelun tulokset 62
6.3 Sisäkoolien prässäykseen vaadittava voima 63
6.4 Laakereiden prässäykseen vaadittava voima 63
7. PÄÄTELMÄT 65
8. YHTEENVETO 68
LÄHTEET 71

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	Välttämätön osa
AEM	engl. *Assembly evaluation method,* kokoonpantavuuden arviointimetodi
APT	Akselitiivisteiden puristaminen tiivistekanteen
B	Ei-välttämätön osa
B	Sisäkoolin leveys
D	Laakeripesän sisähalkaisija
d	Akselin nimellishalkaisija
e_{max}	Ulkokoolin ulkohalkaisijan toleranssin yläraja
D_e	Ulkokoolin vierintäpinnan halkaisija
DFA	engl. *Design For Assembly,* suunnittelu kokoonpantavuuden näkökulmasta
DFAA	engl. *Design For Automated Assembly*, suunnittelu automaattiseen kokoonpanoon
DFMA	engl. *Design For Manufacturing and Assembly*, suunnittelu valmistettavuuden ja kokoonpantavuuden näkökulmasta
D_i	Sisärenkaan vierintäpinnan halkaisija
DIN	saks. Deutsches Institut für Normung, saksalainen standardisoimisjärjestö
ΔD	Todellinen ahdistus, laakeri ja laakeripesä
Δd	Todellinen ahdistus, kooli ja akseli
ΔD_a	Ilmeinen ahdistus, laakeri ja laakeripesä
Δd_a	Ilmeinen ahdistus, kooli ja akseli
E	kokoopantavuuspisteet
E_e	Ulkokoolin kimmokerroin
E_h	Laakeripesän kimmokerroin
E_i	Sisäkoolin kimmokerroin
E_s	Akselin kimmokerroin
E12	Enduro 12, Gardner Denverin ruuviyksikkö
FMS	engl. *Flexible manufacturing system,* joustava valmistusjärjestelmä
h	Ulkokoolin vierintäpinnan ja ulkohalkaisijan välinen suhdeluku
h_{min}	Laakeripesän sisähalkaisijan toleranssin alaraja
h_0	Laakeripesän sisähalkaisijan ja ulkohalkaisijan suhdeluku
HRC	engl. Human-robot collaboration, ihmisen ja robotin yhteistyö
i_{min}	Koolin sisähalkaisijan toleranssin alaraja
K	Kokoonpanon kustannussuhde
K	Koolien & laakereiden prässäämiseen tarvittava voima
k	Sisäkoolin sisähalkaisijan ja vierintäpinnan halkaisijan välinen suhdeluku
k_0	Onton akselin halkaisijoiden suhde
LoA	engl. *Levels of automation*, automaation tasot
m_e	Ulkokoolin poissonin luku
m_h	Laakeripesän poissonin luku
m_i	Sisäkoolin poissonin luku
MML	engl. *Mixed Model Line*, sekamallien kokoonpanolinja
m_s	Akselin poissonin luku
p_m	Kosketuspintojen välinen paine
s_{max}	Akselin ulkohalkaisijan toleranssin yläraja
SVYR	Sokkien vasarointi yksikön runkoon
μ	Kitkakerroin
VSM	Välyksen säätö ja mittaus
LLRK	Laakereiden lyöminen runkoon/kansiin
RAYR	Roottoreiden asettaminen yksikön runkoon

1. JOHDANTO

Neljäs teollinen vallankumous on hyvässä vauhdissa. On hyvä aika tarkistaa oman yrityksensä toimintatapoja. Tekniikat ja valmistusmenetelmät ovat ottaneet jälleen kerran merkittäviä harppauksia eteenpäin. Lyhyessä ajassa on tapahtunut suuria muutoksia, kilpailu markkinoilla on kovaa ja uusia valmistustekniikoita sovelletaan sekä tutkimus- että teollisuuskäytössä onnistuneesti. Tämän vuoksi on tärkeää seurata tilannetta ja tarkastella onko jokin uusista tekniikoista soveltua oman tuotannon tueksi. Työtapoja ei tule muuttaa uutuuden sokaisemana harkitsemattomasti, on kuitenkin tärkeää olla tietoinen tarjolla olevista mahdollisuuksista. Kilpailuedun saavuttaminen ja säilyttäminen on voittoa tavoittelevan yrityksen tärkein tehtävä. Täten on pysyttävä kehityksen mukana ja varmistaa, että saavutettu kilpailuetu pidetään yllä myös tulevaisuudessa. Kilpailuetua tavoitellessa on kuitenkin muistettava, että hyvin tuloksiin päästään vain sitä tukevalla työympäristöllä. Käyttäjien osaamista ja hyvinvointia on tuettava. Tämän laiminlyönti johtaa epäsuotuisiin seurauksiin. Jatkuva kuormitus altistaa väsymykselle ja lisää riskiä sekä loukkaantumisille että virheille. Tästä syystä kokoonpanotyön tulee olla mahdollisimman vaivatonta.

Tämä diplomityö käsittelee Tampereella sijaitsevan Gardner Denver Oy:n toimitiloissa tapahtuvaa kokoonpanotyötä ja etsii vastauksia siihen, kuinka nykyistä kokoonpanoprosessia voitaisiin tulevaisuudessa kehittää niin, että se olisi käyttäjäystävällisempi. Diplomityö keskittyy tarkastelemaan erityisesti ruuviyksikköä Enduro 12 (E12) ja sen kokoonpanopisteellä tapahtuvaa toimintaa. Tarkastelu aloitetaan keräämällä kokoonpanolinjalla työskennelleiden näkemyksiä, joiden avulla tutkimusta lähdetään tarkentamaan. Tavoitteena on kerätä arvokasta kokemukseen perustuvaa tietoa ja lähteä tämän pohjalta arvioimaan tutkitun tiedon perusteella tilannetta. Työssä kehityksen näkökulmana on työntekijöiden työturvallisuuden, työolojen ja ergonomian parantaminen.

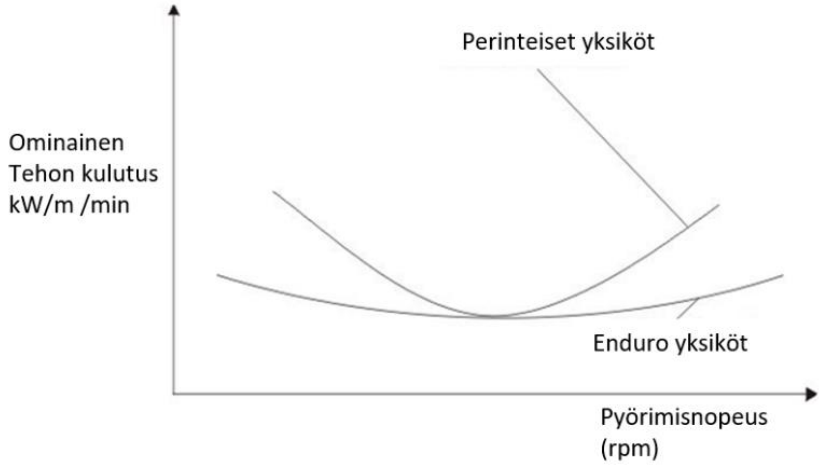
Ruuviyksikön rakenne on osien määrältä ja tyypiltä kokoonpanovaiheessa varsin yksinkertainen. Kokoonpanon oikeaoppinen toteuttaminen ei kuitenkaan ole itsestäänselvyys. Ruuviyksikön toiminnalliset osat ovat suunniteltu ja valmistettu tarkkoja toleransseja noudattaen. Kokoonpanossa on pidettävä huolta, että aiemmissa vaiheissa määritellyt toleranssit saadaan hyödynnettyä oikein. Muussa tapauksessa kompressorin tuotto kärsii. Pahimmassa tapauksessa konetta ei voida ajaa, eikä sitä voida toimittaa asiakkaalle.

1.1 Yritysesittely

Gardner Denver on Pohjois-Amerikkalainen yritys, jonka historia ulottuu vuoteen 1859. Tähän aikaan keksittiin ensimmäiset höyrysäädöt ja yritys perustettiin. 1927 yritys yhdistyi Denver Rock Drill kanssa ja nimi Gardner Denver otettiin käyttöön. Tätä seuraavien vuosikymmenten aikana yritys on jatkanut kasvuaan Pohjois-Amerikassa ja Euroopassa. 2000- luvulle tultaessa Gardner Denver oli globaali toimija, joka tarjoaa paineilma- ja alipaineratkaisuja. Suomessa historia alkaa vuodesta 1963. Tällöin Tampella Tamrock kirjoitti sopimuksen Svenska Rotoromaskiner kanssa ruuvikompressoreiden valmistuksesta. Vuonna 1990 perustettiin kompressoriyhtiö Tamrotor, jonka Gardner Denver osti seitsemän vuotta myöhemmin. Viimeisin muutos rakenteessa tapahtui vuonna 2020, kun Gardner Denver yhdistyi Ingersoll Randin kanssa.

Tällä hetkellä yritys työllistää suomessa yli 270 henkilöä. Yrityksen päätuotteita ovat ruuvikompressorit, paineilman jälkikäsittelylaitteet, yli- ja alipainetuotteet sekä paperi- ja prosessiteollisuuden turbokompressorit.

Tampereen Hankkiossa sijaitsevalla toimipisteellä erityisosaaminen painottuu ruuvikompressoreiden valmistukseen. Harvinaista osaamista löytyy erityisesti roottoreiden valmistukseen liittyen. Tampereen toimipisteellä on pohjoismaalaisittain harvinaista osaamista, sillä roottorit koneistetaan itse. Diplomityössä käsiteltävä ruuviyksikkö E12 kuuluu Enduro- tuoteperheeseen. Enduro- yksiköiden roottorit omaavat perinteisistä roottoreista eroavan profiilin, joka mahdollistaa kompressorin vähäisemmän energian tarpeen. Enduroyksiköiden energiankulutusta on havainnollistettu kuvassa 1.



Kuva 1 Enduron energiatehokkuus perinteiseen yksikköön verrattuna (Tamrotor, 2019)

1.2 Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät

Tutkimuskysymykset työssä ovat seuraavat:

1) Kuinka tutkittavan ruuvikompressorin rakenne noudattaa DFA- suunnitteluohjeistuksia?

2) Miten automaatiolla voitaisiin parantaa työolosuhteita?

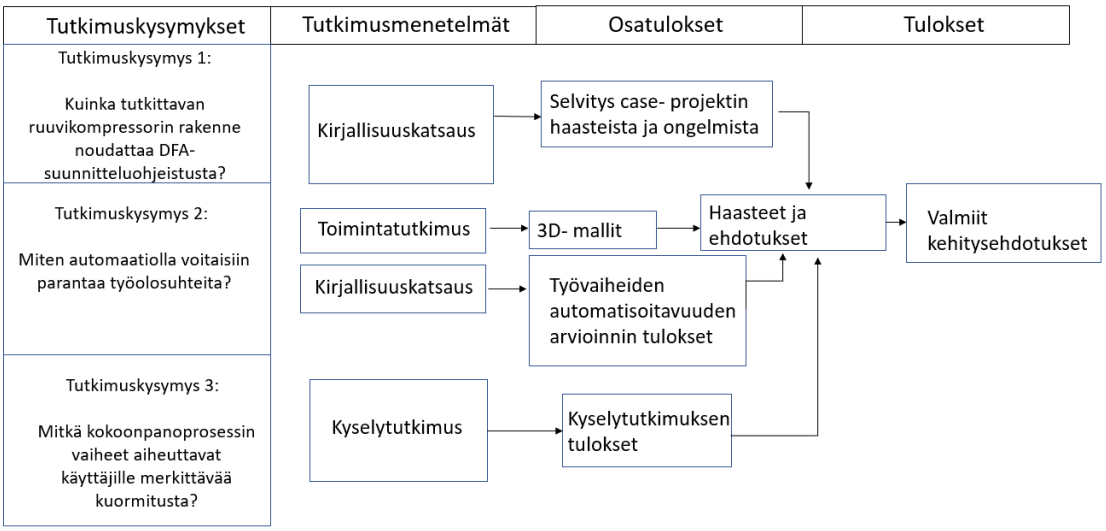
3) Mitkä kokoonpanoprosessin vaiheet aiheuttavat käyttäjille merkittävää kuormitusta?

Tutkimuksen alkuvaiheessa kokoonpanosta selvitetään ne vaiheet, jotka ovat kokoonpantavuudeltaan ongelmallisia tai niiden suorittaminen on ergonomisesti raskasta. Tarkoituksena on suorittaa kyselytutkimus, jonka avulla selvitetään nykyisen kokoonpanon ongelmakohdat. Kyselyn tarkoituksena on selvittää, että mitkä kokoonpanon osa-alueet ovat osoittautuneet sellaisiksi, että niitä olisi syytä kehittää. Kyselyssä painotetaan kompressorin kokoonpantavuuden sujuvuutta sekä työergonomiaa. Tutkimusta varten haastateltaviksi henkilöiksi valitaan kokoonpanotyön avainhenkilöitä. Avainhenkilöitä ovat esimerkiksi kokoonpanolinjojen työntekijät sekä muut henkilöt, jotka ovat aktiivisesti mukana kokoonpanojen toteuttamisessa tai suunnittelussa. Työn tutkimusmenetelmien soveltamisen rakenne on esitettynä kuvassa 2.

Kyselytutkimuksen lisäksi ruuvikompressorin kokoonpantavuutta arvioidaan DFA- menetelmien kokoonpantavuuden ohjeistuksien avulla. Suoritetun tarkastelun pohjalta arvioidaan mahdollisia kehityskohteita ja pyritään luomaan niihin ehdotuksia ja ratkaisuita. Diplomityön aikataulun salliessa luotuja ratkaisuita testataan myös tuotantoympäris-

tössä, jotta saataisiin todellisia käyttökokemuksia. Kokoonpantavuuden tarkastelu pyritään toteuttamaan automaation näkökulmasta. Kohdeyritys on kiinnostunut automaation soveltamisen mahdollisuudesta kokoonpanotyössä. Tavoitteena on kerätä tietoa, jota voidaan hyödyntää, kun yksikön kokoonpanon automatisointi nähdään ajankohtaiseksi. Kokoonpantavuuden tarkastelu suoritetaan kirjallisena katsauksena.

Työn tutkimustapana tai tutkimusstrategiana on tapaustutkimus eli case- tutkimus. Työn tarkoitus ei ole käsitellä asioita yleisellä tasolla. Tavoitteena on analysoida kohdeyrityksen tilannetta ja tarkastella sitä tapaukseen sopivin työkaluin. Näiden perusteella tehdään johtopäätöksiä, joita voitaisiin hyödyntää tutkittavan aihealueen päivittäisessä toiminnassa.



Kuva 2 Tutkimusmenetelmät

2. SUUNNITTELU KOKOONPANTAVUUDEN NÄKÖKULMASTA

Tässä luvussa käsitellään työssä sovellettavia Design For Assembly (DFA) suunnitteluohjeistuksia. Tarkoituksena on antaa lukijalle yleiskuvaus sovellettavasta menetelmästä ja erityisesti niistä osa-alueista, joita työn soveltavassa osuudessa käytetään. Työn teeman mukaisesti luvussa pyritään tarkastelemaan menetelmiä erityisesti automatisoitavien kokoonpanojen näkökulmasta. Tutkimuksessa työkalun soveltamisen merkittävimpänä pyrkimyksenä on tarkastella nykyisen kokoonpanon automatisoitavuutta.

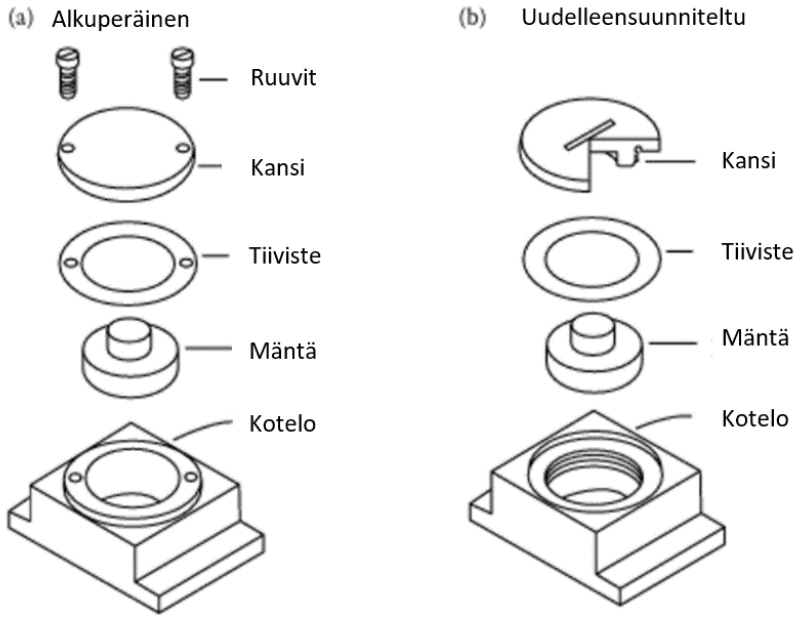
2.1 Menetelmien määrittely

DFA tarkoittaa tuotteen suunnittelua helpon kokoonpantavuuden näkökulmasta. Metodeja sovelletaan erityisesti kolmen käyttötarkoituksen vuoksi. Eräs näistä on antaa suunnitteluosastolle ohjeita tuotteen yksinkertaistamiseksi, jonka myötä saadaan laskettua kokoonpanokustannuksia ja parantaa laatua. Yhtenä syynä on saada vertailutyökalu kilpailijoiden tuotteiden tutkimiseen ja kokoonpanovaikeuksien kvantifiointiin. Viimeisenä oleellisena sovellusperusteena teoksessa (Boothroyd et al. 2010, s.1) että menetelmä tarjoaa ”pitäisi maksaa” työkalun, joka helpottaa kontrolloimaan kustannuksia ja toimitussopimuksia.

DFA metodeja on ollut olemassa noin 40 vuoden ajan ja niitä on sittemmin sovellettu laajalti teollisuudessa. Yleisiä kaupallisesti saatavilla olevia DFA metodeja ovat esimerkiksi Boothroyd–Dewhurst metodi, Lucas DFA metodi sekä Hitachi AEM. Esimerkiksi edellä mainittujen soveltamisen on havaittu tuovan merkittäviä hyötyjä kokoonpantavuuteen ja valmistusaikoihin. On myös havaittu, että tuotteiden laatu on parantunut, kun niiden suunnittelussa on sovellettu DFA- ohjeistuksia (Dalgleish et al. 2000). Yleisesti ottaen ajatellaan olevan kaksi tapaa, joilla DFA:ta esitetään (Moultrie & Maier 2014, s.4):

Yleinen DFA heuristiikka: Tämä heuristiikka esitetään usein kahdella kuvalla, joista ensimmäisessä on esitettynä esimerkki hyvästä käytännöstä ja toisessa huonosta käytännöstä. Heuristisien kuvauksien ja periaatteiden etuna on niiden graafisen esitystavan tuoma helppo ymmärrettävyys. Niiden soveltaminen on kuitenkin suunnittelun tarkastelussa vaikeaa, koska tapoja on lukemattomia, eikä niiden systemaattinen hyödyntäminen ole mahdollista. Kuvassa 3 on esitettynä esimerkki DFA heuristiikasta.

Systemaattiset kokoonpanon analysointimetodit: Nämä metodit tarjoavat suunnittelijalle systemaattisen tavan arvioida kokoonpanoa, ja tunnistaa kehittämismahdollisuudet. Tämän kategorian sovelletuimmat metodit etenevät tarkastelussa samankaltaisella tavalla. Ensimmäisenä keskitytään määrittämään, voidaanko komponenttien kokonaismäärää vähentää. Tämän jälkeen suoritetaan yksityiskohtainen tarkastelu käsittelystä, sovittamisesta ja kiinnittämisestä jokaiselle osalle. Metodit sisältävät pisteytysjärjestelmän, jota voidaan soveltaa jokaiselle komponentille ja kokoonpanoprosessin osuudelle. Pisteytyksen avulla saadaan luotettavasti havainnollistettua asennettavan komponentin kompleksisuutta. Pisteytysjärjestelmä perustuu useiden yritysten tilanteista kerättyihin kokemuksiin.



Kuva 3 Esimerkki heuristisesta kuvauksesta. Mukailtu lähteestä (Boothroyd et al. 2010, s.198)

Lempiäisen ja Savolaisen mukaan osien yksityiskohtainen tarkastelu etenee usein seuraavalla tavalla (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.161–162):

- *Funktionaalinen analyysi*: Tarkastellaan komponenttia ja arvioidaan sen tarpeellisuutta. Arviointi perustuu osan vaikutukseen liikuttamisessa, materiaalieron tarpeeseen toiminnallisissa tarkoituksissa tai tarpeeseen säädettävyydessä. Jos mikään näistä ehdoista ei täyty, osan voidaan ajatella olevan tarpeeton.
- *Käsittelyn analyysi*: Tarkastellaan komponentin käsittelyn vaikeutta. Tarkastelu voi olla joko manuaalisen käsittelyn tarkastelu tai automaattisen käsittelyn tarkastelu. Yleisesti komponentit, jotka ovat erittäin pieniä, hankalia tai ovat vaikeita erotella pidetään vaikeina käsitellä ja syöttää. Tämän osuuden tavoitteena on

määrittää, kuinka helppoa on asettaa komponentti oikeaan asentoon valmiissa kokoonpanossa.

- *Kiinnittämisen analyysi*: Tarkastellaan kuinka yksinkertaista osan sijoittaminen ja kiinnittäminen muuhun kokoonpanoon on.

2.2 Menetelmien taloudellinen motiivi

Metodien hyödyntäminen ensikerran suunnitteluvaiheessa on suositeltavaa, sillä tuotteen suunnittelu määrittelee mm. rakenteen, kokoonpanometodit, komponenttien määrän, materiaalit, toleranssit ja pinnanlaadun. Tämä tarkoittaa sitä, että suunnitteluvaiheessa tehdyillä päätöksillä on merkittävä vaikutus myös tuotteen valmistusprosessin myöhemmissä vaiheissa (Andreasen & Myrup 1988, s.13). Metodit ovat useissa tapauksissa osoittautuneet tehokkaiksi menetelmiksi. Tähän diplomityöhön sopivana esimerkkinä voidaan nostaa Ingersoll Randin raportoima tapaus, jossa Boothroyd-Dewhurst, Inc., toimittaman Design For Manufacturing and Assembly (DFMA) sovelluksen avulla saatiin lyhennettyä tuotekehitysaikaa 2 vuodesta 1 vuoteen. Tämän lisäksi DFMA sovellusta käyttänyt ryhmä vähensi kompressorijäähdyttimen ja öljynviilentimen kokoonpanon komponenttien määrää 51 kappaletta, kiinnikkeiden määrää 18 kappaletta ja kokoonpanon vaiheiden määrää 119 kappaletta. Näiden lisäksi kokoonpanoaikaa saatiin laskettua 18,5 minuutista 6,5 minuuttiin (Boothroyd et al. 2010, s.3).

Aiemmin kustannuslaskelmissa tuotteen suunnittelun kustannukset usein aliarvioitiin. Laskelmissa suunnittelun kustannukset arvioitiin vain suunnittelutyöhön kuluvana aikana ja resursseina. Tutkimukset ja kokemus ovat kuitenkin osoittaneet, että todellisuudessa yli 70 % lopullisen tuotteen kustannuksista määritellään suunnitteluvaiheessa (Andreasen & Myrup 1988, s.13).

Edellä mainittua tukevat myös Lempiäinen ja Savolainen teoksessaan (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.155). On laajalti hyväksytty totuus, että 75–85 % tuotteen hinnasta sidotaan jo suunnittelun aikana. Tästä syystä tuotanto- ja kokoonpano-ongelmien arviointi jo suunnittelun aikana on parhaaksi havaittu tapa nostaa tuottavuutta ja vähentää kokoonpanosta aiheutuvia kustannuksia.

Kuten sanottua, DFA menetelmien käyttö suunnittelun alkuvaiheessa on suositeltavaa. Tuotteiden alkuperäinen suunnitteluvaihe ei ole kuitenkaan ainut tilaisuus soveltaa menetelmiä. Valmistavassa teollisuudessa esiintyy tapauksia, että jotain onnistuneena pidettyä tuotetta tarkasteta pitkään aikaan. Tämän takia tuote voi olla kuitenkin kokoonpantavuudeltaan kompleksinen (Andreasen & Myrup 1988, s.13).

Jättämällä uudelleensuunnittelu toteuttamatta syyllistytään erääseen vääristyneeseen syyhyn olla käyttämättä DFA:ta. Tuotteen hyvyytenä pidetään sen yksittäisten komponenttien alhaisia valmistuskustannuksia. On kuitenkin huomattu, että yksittäisten kappaleiden suunnittelu valmistuksen helppouden kannalta voi olla kokoonpanotyötä rajoittava tekijä. Esimerkiksi ohutlevykappaleessa se voi rajoittaa mahdollisten taivutusten määrää, joka johtaa suurempaan määrään osia, mikä tarkoittaa enemmän vaiheita kokoonpanovaiheessa. Kokemus on kuitenkin osoittanut, että on usein parempi laittaa kappaleeseen mahdollisimman paljon toiminnallisuuksia. Vaikka tämä usein nostaakin valmistuskustannuksia. (Boothroyd et al. 2010, s.3; Eteläaho et al. 1999, s.17)

2.3 DFA ohjeistus ja tavoitteet

Luvussa aiemmin mainitut DFA metodit Boothroyd–Dewhurst, Lucas DFA sekä Hitachi Assembly Evaluation Method (AEM) ovat eri tutkimusryhmien ja yritysten erityisiä toteutuksia lähestyä kokoonpantavuutta. Ne kaikki rakentuvat kuitenkin samankaltaisten ohjeistuksien ympärille, jotka ovat esitetty teoksessa (Booker et al. 2005, s.280–281). Taulukossa 1 on esiteltynä nämä yleiset DFA ohjeistukset ja tavoitteet.

Taulukko 1 DFA ohjeistus ja tavoitteet (Booker et al. 2005, s.281)

Kokoonpanotason ohjeistus
Optimoi osien määrä ja tyyppi yhdistämällä ominaisuuksia/osia
Vähennä variantteja ja modularisoi suunnittelu
Suunnittele optimaalinen kokoonpanojärjestys
Suunnittele kokoonpanon runko niin, että se toimii alustana muulle kokoonpanolle
Suunnittele kokoonpanoprosessi kerroksittain (ylhäältä alkaen)
Pidä painopiste matalalla
Hyödynnä painovoimaa kokoonpanovaiheissa
Minimoi valmiin tuotteen paino
Suunnittele osat mahdollisimman monikäyttöisiksi
Pyri välttämään säätöjä (Erityisesti sokeita säätöjä ja simmausta)
Varmista esteetön pääsy ja näköesteet
Eliminoi tarpeettomat liitokset
Minimoi kiinnitysmenetelmien määrä

Sovella yleisiä ja tehokkaita kiinnitysmenetelmiä jos niiden käyttö on välttämätöntä
Komponenttitason ohjeistus
Käytä standardikomponentteja aina kuin mahdollista
Pyri osien symmetriaan
Suunnittele osat niin, että väärin asentaminen on mahdotonta
Minimoi osien käsittelyn tarve ja kääntely
Suunnittele osat niin, että niiden käsittely on helppoa myös massana (vältä sotkeutumista ja jumiutumista mahdollistavia muotoja)
Suunnittele osat jäykiksi ja tukeviksi, ei löysiksi ja hauraiksi
Suunnittele osat itsestään kohdistuviksi ja paikoilleen asettuviksi. Sovella kartiomaisuutta, viisteitä ja pyöristyksiä
Keskity myös yksityiskohtien suunnitteluun
Vältä purseita ja lastuja komponenteissa

2.4 Kokoonpantavuuden analysointityökaluja

Kun DFA:n arvo tunnistettiin, kehitettiin useita menetelmiä ja tekniikoita, joiden tavoitteet eroavat toisistaan. Hitachin kokoonpantavuuden arviointimetodi kehitettiin Hitachi Ltd:n toimesta 1970 luvulla. Sen tarkoituksena on tarjota tuotteen suunnittelijalle aikaisessa vaiheessa tietoa suunnittelun kokoonpanon haastavuudesta. Hitachin metodissa samoja periaatteita sovelletaan manuaaliselle sekä automatisoidulle kokoonpanolle. Tämä lähestymistapa ei ole kuitenkaan heikentänyt yritysten kiinnostusta menetelmää kohtaan. (Leaney & Wittenberg 1992, s.9)

Lucas metodi syntyi yhteistyössä Lucas organisaation ja Hullin yliopiston toimesta. Metodi perustuu kokoonpanojärjestyksen vuokaavioon. Menetelmä sisältää suunnitteluongelmiin liittyvien rangaistustekijöiden määrittämisen ja summaamisen vastaavalla tavalla kuin Hitachi metodi. Lucas metodi sisältää myös käsittelyn ja kiinnittämisen analyysin. Lucas metodissa ohjelmisto piirtää havainnollistavaa kokoonpanosekvenssiä sitä mukaa, kuin kokoonpanon tarkastelua suoritetaan. (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.157–158)

Boothroyd-Dewhurst metodi julkaistiin ensimmäisen kerran 1980- luvulla. Sitä on sittemmin päivitetty useita kertoja. Tänä päivänä Boothroyd-Dewhurst metodin soveltamisen

tukena käytetään ohjelmistopakettia sekä käsikirjaa. Metodin ensimmäisenä vaiheena on selvittää, suoritetaanko kokoonpano manuaalisesti, suuren nopeuden automaatiolla vai robotisoidusti. Tämä valinta perustuu analyysiin odotetuista tuotantomääristä, takaisinmaksuajasta, osien määrästä sekä ohjelmistolla selvitettävästä laitteiden hinnasta. Mitä korkeammat laitekustannukset ovat suhteessa työvoimakustannuksiin, sitä vähemmän kannattava vaihtoehto automatisointi on (Leaney & Wittenberg 1992, s.11).

2.4.1 Boothroyd-Dewhurst

Boothroyd-Dewhurst metodissa DFA:n lopullinen arviointimenetelmä valitaan automaation tason ja tyypin perusteella. Suuren nopeuden automaatiolla suoritettavan kokoonpanon tapauksessa tarkastelu keskittyy indeksointikoneeseen ja liukuhihnakokoonpanoon, jotka ovat järkeviä vain suurille tuotantomäärille. Manuaalinen kokoonpano sopii alhaisille tuotantovolyymeille. Robotilla tehtävä kokoonpano asettuu näiden kahden väliin.

Robotisoitujen kokoonpanojärjestelmien toteutuksissa on havaittu, että seuraavat kokoonpanojärjestelmät ovat suositeltavia työkalujen vaihtotarpeiden vähentämiseksi: yksi asema ja yksi robotti, yksi asema kahdella robotilla sekä usean robotin linja (Huang 1996, s.53).

Riippumatta mikä kokoonpanon automaation tasoksi valitaan, suoritetaan kokoonpanon osille arviointi seuraavasti: käsittelyn haastavuus, kokoonpanoliitoksen haastavuus ja osan tarpeellisuuden arviointi. Jos saatavilla on ohjelmisto, niin tuloksia verrataan ohjelmistossa oleviin tietoihin ja tämä luo kokoonpantavalle osalle kokoonpanoajan ja -hinnan. Kokoonpantavuustarkastelu toteutetaan muodostamalla ensin kokoonpanon osista osaluettelon mukainen työlista. Työlistan muodostamisen jälkeen aloitetaan tarkastelu, jossa on tavoitteena poistaa kokoonpanosta osia. Jokainen osa tarkastetaan yksitellen ja siitä pyritään tunnistamaan sen olemassaolon syy. Tätä osien tarpeellisuuden tarkastelua pidetään kokoonpantavuuden kehittämisen perustana (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.161).

Teoksessa (Boothroyd et al. 2010, s.10–11) esitellään suunnittelijan avuksi 3 kriteeriä, joiden avulla suunnittelija tarkastelee, voidaanko osa poistaa kokoonpanosta. Tarkasteltavat kriteerit ovat seuraavat:

1. Liikkuuko osa tuotteen käytön aikana merkittävästi muihin jo koottuihin komponentteihin nähden? Vain isot liikkeet hyväksytään myönteiseksi vastaukseksi. Vähäiset liikkeet, jotka voidaan suorittaa esimerkiksi elastisilla saranoilla eivät ole tarpeeksi merkittäviä myönteiseen vastaukseen.

2. Onko osan välttämätöntä olla eri materiaalia tai erillään muista jo kootuista osista?
3. Onko osan välttämätöntä olla erillinen jo koottuihin osiin nähden, koska muuten tarvittavien osien purkaminen ja kokoonpano olisi mahdotonta toteuttaa?

Jos osan olemassaoloa ei kyetä perustelemaan edes yhdellä näistä syistä, sille annetaan teoreettinen osan minimiarvo 0. Yhdenkin listatuista kriteereistä täyttyessä, osalle annetaan arvoksi 1. Näitä saatuja arvoja hyödynnetään tarkastelun myöhemmässä vaiheessa, kun selvitetään suunnittelutehokkuutta.

Manuaalisen, robotisoidun sekä automatisoidun kokoonpanon DFA arviointimenetelmät etenevät niin, että työlistaa käydään läpi rivi kerrallaan. Yksi komponentti vie yhden rivin. Jokaisella rivillä arvioidaan kunkin komponentin käsiteltävyyttä ja kiinnittämistä. Lopputuloksena riville saadaan yksittäisen osan käsittelykustannukset. Kun jokaisen komponentin käsittely- ja kiinnityskustannukset on tarkasteltu, saadaan niiden summana kokoonpanon kokonaiskustannukset. Vaikka tarkastelu antaakin eksaktilta kuulostavan taloudellisen vastauksen on sen soveltamisessa absoluuttisena totuutena käytettävä harkintaa. Saadun arvon ensisijaisena tarkoituksena on toimia vertailukohteena sille, että olisiko suunnittelumuutos hyvä vai huono, ja kannattaisiko sitä lähteä toteuttamaan. Todettaessa suunnittelumuutoksen vaikuttavan käyttökelpoiselta, voidaan toteuttaa tarkempi laskelma kokonaiskustannuksista ottamalla mukaan kalibrointivakiot. Kalibrointivakiot ottavat huomioon muun muassa seuraavia asioita: työntekijöiden palkkataso, automaatiolaitteisto, vaadittu takaisinmaksuaika ja tarkennetut arviot vaadittavista tuotantomääristä (Huang 1996, s.53–54).

Teoreettinen minimimäärä osia on summa niistä osista, jotka saivat osan tarpeellisuuden arvioinnissa arvon 1. Aiemmin mainittu suunnittelutehokkuus on määritelty seuraavalla tavalla: ihanteellinen kokoonpanoaika jaettuna arvioidulla kokoonpanoajalla. Ihanteelliseksi kokoonpanoajaksi on esitetty 3 sekuntia. Tämä kolme sekuntia koostuu käsittelyajan ja kokoonpanoajan summasta. Ihanteellisessa tilanteessa näiden molempien arvojen on katsottu olevan 1,5 sekuntia. Vertailukelpoisimpiin tuloksiin päästään, jos on mahdollista verrata uudelleensuunnittelun laatua saman tuoteperheen tuotteisiin tai kilpailijoihin (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.162).

2.4.2 Lucas DFA

Lucas DFA metodia voidaan käyttää sekä manuaaliselle, että automatisoidulle kokoonpanolle. Metodissa kolme indikaattoria määrittää kokoonpanon hankaluuden. Lisäksi

metodissa suoritetaan toiminnallinen analyysi, jossa määritetään mitkä yksittäiset komponentit ovat tarpeellisia ja mikä on niiden funktio (Matuszek et al. 2020, s.116).

Lucas metodi sisältää arvioinnin käsittelystä ja kiinnittämisestä. Näistä arvioituja rangaistustekijöitä muokataan kolmeksi kokoonpantavuuden indikaattoriksi. Indikaattorit ovat seuraavat: suunnittelun tehokkuus, syöttöindeksi ja kiinnitettävyysindeksi. Saatuja arvoja verrataan kynnysarvoihin tai edellisistä suunnitteluista saatuihin arvoihin. Syötön ja kiinnittämisen analyysit toteutetaan funktionaalisella analyysillä. Funktionaalinen analyysi muistuttaa Boothroyd-Dewhurst metodin analyysiä (Leaney & Wittenberg 1992, s.14).

Funktionaalinen analyysi suoritetaan useimmiten yksi osa kerrallaan. Osasta tutkitaan, esiintyykö se funktionaalisista syistä vai ei. Jokainen osa saa joko arvon A tai B. Jos osa saa arvon A, se on välttämätön osa. Osan saadessa arvon B, se on ei-välttämätön osa. Ratkaistuja arvoja A ja B hyödynnetään kokoonpantavuuden indikaattorien ratkaisemisessa. Suunnittelun tehokkuuden laskennassa optimoidun kokoonpanon arvoksi on ilmoitettu 60 %. Todellisissa käytännön tilanteissa arvoksi asetetaan kuitenkin 45 %. Kokemuksen perusteella ei ole tavatonta, että lähtötilanteessa arvo on noin 3 % - 12 % luokkaa (Huang & Mak 1999, s.21).

Syöttöanalyysi koostuu kysymyksiin vastaamisesta komponenteittain. Näiden kysymysten vastausten perusteella saadaan muodostettua syöttöindeksi. Syöttöindeksin minimiarvo on 1 ja kynnysarvoksi on määritetty 1.5. Jos komponentin arvo ylittää kynnysarvon, menetelmä suosittelee tarkastelemaan sen kehitysmahdollisuuksia. Kiinnittämisen analyysi etenee vastaavalla tavalla kuin syöttöanalyysi (Leaney & Wittenberg 1992, s.14).

Suunnittelun tehokkuus (1), syöttösuhde (2) ja kiinnityssuhde (3) saadaan ratkaistua hyödyntämällä seuraavia yhtälöitä (Huang 1996, s.51–52):

$$Suunnittelun\ tehokkuus = \frac{A}{(A+B)}, \tag{1}$$

Jossa:

$\boldsymbol{A}$ = Välttämättömät osat

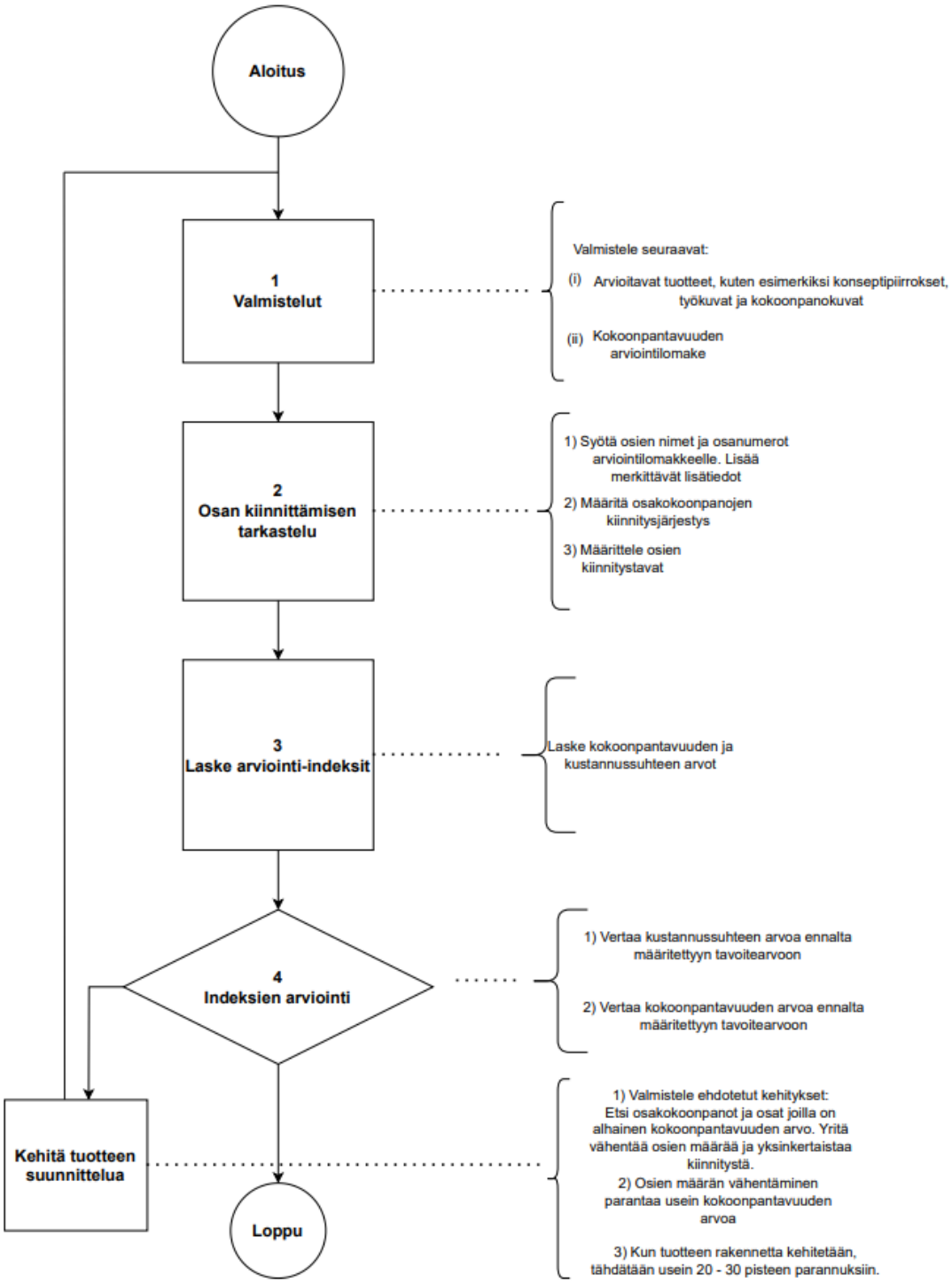
$\boldsymbol{B}$ = Ei-välttämättömät osat

$$Syöttösuhde = \frac{Syöttöindeksien\ summa}{Tyypin\ A\ osien\ \text{määrä}}, \tag{2}$$

$$Kiinnityssuhde = \frac{kiinnitysindeksien\ summa}{Tyypin\ A\ osien\ \text{määrä}}, \tag{3}$$

2.4.3 Hitachi

Hitachin kokoonpantavuuden arviointimenetelmän päätavoitteena on helpottaa kehitystyötä tunnistamalla suunnittelun heikkoudet jo suunnitteluprosessin aikaisessa vaiheessa. Tämän ratkaisemiseksi sovelletaan kahta indeksiä. Ensimmäinen näistä arvioidaan kokoonpantavuuspisteitä (E). Tämä indeksi keskittyy arvioimaan kokoonpantavuuden haastavuutta. Toinen indeksi on kokoonpanon kustannussuhde (K), jota käytetään arvioimaan kustannusten pienentymistä verrattuna ”standardituotteeseen” tai vanhaan versioon (Bogue 2012, s.113). Hitachin menetelmän arviointiprosessia on esitelty vuokaaviolla kuvassa 4.



Kuva 4 Hitachin kokoonpantavuuden arviointimenetelmän suorittaminen. Mukaillen lähdettä (Huang 1996, s.48)

2.5 Tarkistuslista

Rakenteeltaan yksinkertaisin arviointimenetelmä kokoonpantavuuden tarkasteluun on tarkistuslista. Tarkistuslistan etuihin kuuluu sen helppo adaptoituvuus muutoksiin ja tarkempiin räätälöinteihin. Listaa voidaan soveltaa pienellä työllä tuoteperheen jäsenten mukaisiin erityistarpeisiin. Toisinaan tarkistuslistojen käyttöä laajennetaan yrityksen laatujärjestelmään. Soveltamalla edellä mainittua suunnitteludokumentteihin saadaan dokumentoitua mitä on tehty tarkistuslistan suunnitelman mukaan ja vastaavasti, milloin on hyvin perustein toimittu tätä vastaan. Tarkistuslistapohjia on olemassa sekä manuaalisille, että automaattisille kokoonpanoille. Alla on esiteltynä tarkistuslista robotisoituun kokoonpanoon (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.154).

1. Tuodaanko osa kokoonpanoon orientoituna, nauhaan kiinnitettynä vai makasiinissa?
2. Tuodaanko osa kokoonpanoon orientoimattomana?
3. Millainen kuljetin tuo osat kokoonpanopaikalle?
4. Onko suunnittelu toteutettu niin, että osa ei puristukseen joutuessaan tuki syöttörataa?
5. Onko valmistuksesta syntyneet purseet otettu huomioon? Onko niistä haittaa orientointiin, kuljetukseen, siirtoon tai kokoonpanoon?
6. Onko osassa sekä kohdekappaleessa tarvittavat ohjaukset kokoonpanon helpottamiseksi?
7. Onko työkaluille tarvittava määrä tilaa?
8. Vaatiiko osan kokoonpano voimaa?
9. Pysyykö osa ennen kiinnitystä paikallaan vai onko sitä tuettava?
10. Aiheuttaako osan toleranssit, materiaali tai pintakäsittely erityisvaatimuksia kokoonpanolle?
11. Mitkä osaan liittyvät toiminnalliset asiat on huomioitava kokoonpanossa?

2.6 Manuaalisen vs. automaattisen kokoonpanon tarkastelu

Suunnittelu kokoonpanon kannalta on tärkeää suunniteltaessa manuaaliseen kokoonpanoon ja sen avulla voidaan saavuttaa suuria etuja. Automaattiseen kokoonpanoon suunniteltaessa on vieläkin tärkeämpää pitää mielessä kokoonpanon helppous ja yksi-

selitteisyys. Taloudellisen automaattisen kokoonpanon saavuttamiseksi tuotteen rakenteen ja komponenttien suunnittelun tarkka toteutus on välttämätöntä. Yhtenä automaation käyttöönoton suurimmista eduista voidaan katsoa olevan sen luoma tarve uudelleensuunnitteluun. Automaation lisäksi, saavutetaan parannetun tuotesuunnittelun edut. Usein uudelleensuunnittelusta saavutetut säästöt ovat jopa suuremmat kuin automaation käyttöönotosta saavutetut säästöt (Boothroyd, 2005, s.257).

Kokoonpantavuuden tarkastelumenetelmien soveltamisen on todettu useissa tapauksissa olleen hyödyllisiä riippumatta siitä, onko lopullinen tuotantolinja ollut automatisoitu vai manuaalinen. Tämä huomattiin kehittyneiden valmistusteknologioiden ja Flexible Manufacturing Systems (FMS) kehityksen aikaan. Tällöin noteerattiin, että sen hetkiset kokoonpanot eivät ole rakenteeltaan automatisoituun kokoonpanolinjaan sopivia. Tämä johti kokoonpanojen uudelleensuunnitteluun ja tuotteiden yksinkertaistamiseen. Uudelleensuunnittelun ansiosta useat uudet kokoonpanot tulivat niin yksinkertaisiksi, että niiden manuaalinen kokoonpano oli taloudellisesti niin kannattavaa, että automatisoidun kokoonpanolinjan hankkimisen taloudellisesta perustelusta tuli vaikeaa (Huang 1996, s.42–43; Leaney & Wittenberg 1992, s.8).

Jos tuote on valmistettu automaattista kokoonpanoa varten, se on myös yksinkertaista kokoonpanna manuaalisesti. DFA menetelmän soveltaminen manuaalista kokoonpanoa varten ei kuitenkaan tarkoita, että tuotteet olisivat välttämättä sopivia automaattiseen kokoonpanoon. Tästä voidaan todeta, että jos yritys haluaa soveltaa DFA:ta on järkevintä suorittaa tarkastelu alusta lähtien Design for automated assembly (DFAA) kannalta maksimaalisen hyödyn saavuttamiseksi. Suunnittelu automaattista kokoonpanoa varten takaa myös helpommin käytettävän option, jos automaatio tuleekin tulevaisuudessa ajankohtaiseksi (Eskilander 2003, s.27).

Tähän liittyen Lempiäinen ja Savolainen esittävät teoksessaan (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.155) usein toistettavia kokoonpanoja suunnittelevalle henkilölle ohjeistuksen: ” Suunnittele aina automaatiota varten vaikka siihen ei ole taloudellisia edellytyksiä tuoteperheellä vielä olisikaan. Kokoonpanotyön yksinkertaistaminen antaa joka tapauksessa suuren hyödyn myös käsikokoonpanossa.”

3. KOKOONPANOTYÖN ERGONOMIA

Yleisesti kokoonpanolinja voidaan määrittää tuottamaan yksittäistä tuotetta tai useita tuotemalleja, joissa useita tavaroita voidaan käsitellä samanaikaisesti erissä tai käsitellä kerralla yhden tuotteen eräkoot kullekin tuotemallille. Becker ja Scholl esittävät kolme tyypillisintä kokoonpanolinjan tasapainotusongelmaa artikkelissaan (Becker & Scholl, 2006):

1. Yhden mallin kokoonpanolinjan tasapainotusongelma
2. Erämallin kokoonpanolinjan tasapainotusongelma
3. Sekamallin kokoonpanolinjan tasapainotusongelma

Julkaistu kirjallisuus kokoonpanosysteemien suunnittelusta keskittyy usein tasapainottamiseen ja sekamallin kokoonpanolinjan erilaisten layoutien tarkasteluun. Tarkastelu keskittyy esimerkiksi olemassa olevien linjojen optimointiin ja uudenlaisten kokoonpanosysteemien konfigurointiin. Vähemmälle huomiolle tai jopa täysin huomiotta jäävät esimerkiksi kokoonpanolinjan ergonomia, tehtäville annettujen arvojen toteutettavuus sekä oikeus (Battini et al 2011, s.30).

Osa kokoonpanolinjalla tehtävistä suoritteista, erityisesti useasti toistuvat liikkeet huomattavalla rasituksen tasolla tai pitkät ajanjaksot huonossa asennossa, tulevat pidemmällä tarkasteluvälillä ongelmiksi. Ne saattavat johtaa työntekijöillä esiintyviin työperäisiin tuki- ja liikuntaelinten sairauksiin (Kumar 1998, s.146).

On selvää, että kokoonpanosysteemillä ja työergonomialla on vahva yhteys sekä teoriassa, että käytännössä. Edut, joita saavutetaan työergonomian suunnittelulla ilmenevät vähentyneenä loukkaantumisriskinä. Lisäksi työolot paranevat fyysisesti, psykososiaalisesti ja kaikki kustannukset liittyen poissaoloihin, sairasvakuutuksiin ja kuntoutukseen vähenevät merkittävästi. Ergonomian kehittäminen parantaa laatua ja käyttäjien tuottavuutta. Ergonomian tason arvioinnin suorittaa usein alan asiantuntija. Työpisteiden layoutit ovat kuitenkin suunnitelleet insinöörit ja tällöin tulokset ovat ergonomian näkökulmasta usein huonoja ja eivätkä tältä osin lisää tuottavuutta. Tilanne on pahimmillaan jopa haitallinen. Eräs yhdysvaltalainen konsulttiyritys on arvioinut, että keskimääräinen sijoitetun pääoman tuotto jokaista työolojen parantamiseen käytettyä 1 $ kohden on 6,23 $. Tämä havainnollistaa, että ergonomia on osa-alue, jossa insinööreillä voi olla merkittävä haittavaikutus yrityksen suoriutumiseen (Carey & Gallwey 2002, s.825–828).

Yhdysvaltojen työturvallisuus ja -terveysosaston mukaan yli 30 % eurooppalaisista valmistavan teollisuuden työntekijöistä kärsii alaselän vaivoista. Luku jo pelkästään yhdestä vaivasta on valtava, kuten myös sen tuomat sosiaaliset ja taloudelliset vaikutukset. Saadaksemme tilanteeseen merkittävää parannusta, on uusien automaatioratkaisuiden vastattava myös ergonomian asettamiin vaatimuksiin (Krüger et al. 2009, s.628).

3.1. Tuotantovaatimusten vaikutus työolosuhteisiin

Valmistajat pyrkivät valmistamaan ja toimittamaan mahdollisimman laadukkaita tuotteita. Kilpailullisista syistä on kuitenkin tärkeää, että saadaan tuotettua parhaita mahdollisia tuotteita mahdollisimman alhaisella hinnalla. Osana tätä tulee vaatimuksia: vaaditaan korkeaa kokoonpanotehokkuutta ja toimitustarkkuutta. Edellä mainittujen kokonaisuus johtaa tilanteeseen, jossa tuotanto häiriintyy helposti linjalla tapahtuvista virheistä ja häiriöistä. Nykypäivänä asiakkaat vaativat korkealaatuisia tuotteita, lyhyitä toimitusaikoja ja massaräätälöintiä. Tämä on muodostunut nykypäivän valmistavan teollisuuden paradigmaksi (Koren 2010, s.26).

Seurauksena edellisessä aiemmin esitetystä: tämän päivän kokoonpanosysteemit täytyy suunnitella vastaamaan asiakastarpeisiin ja samaan aikaan saavuttaa laatu ja tuottavuus. Kysymyksenä on, kuinka suunnitellaan systeemit ja organisoidaan tuotanto niin, että ne mahdollistavat tuotantomäärät tinkimättä laadusta ja tuottavuudesta? Kokoonpantavuuden tarkastelu on yksi vaihtoehto, jolla voidaan parantaa tilannetta. Kokoonpantavuudella tarkoitetaan kappaleiden tarttumisen, sijoittamien ja käsittelyn helppoutta kokoonpanoprosessin aikana (Falck et al. 2014, s.455).

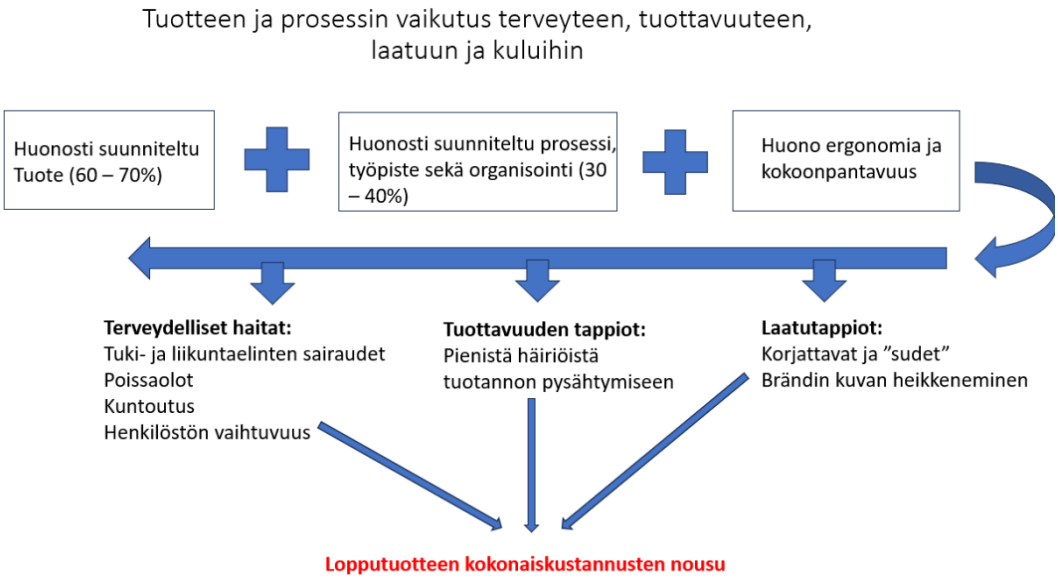
Käyttäjät vaativissa kokoonpano-olosuhteissa joutuvat tekemään päätöksiä paineen alla. Toistuvassa kokoonpanotyössä kognitiiviset ja fyysiset tekijät asettavat usein suuria vaatimuksia ihmisen suorituskyvylle. Tämän seurauksena on virheitä, laatupuutteita ja muita kokoonpanoon liittyviä ongelmia. Tämän vuoksi on tärkeää, että kokoonpanotyössä kokoonpano ja työkalut on tehty mahdollisimman yksiselitteisiksi ja vaivattomiksi (Zhu et al. 2008, s.6).

Korjaavat toimenpiteet tehdään usein liian myöhään. Niitä toteutetaan useimmissa tapauksissa vasta siinä vaiheessa, kun ongelmia on jo ilmennyt. Ennakoiva riskin tunnistaminen tuotekehityksen varhaisessa vaiheessa on edelleen valitettavan epätavallista. Siitä huolimatta, että taloudellisen ja inhimillisen hyödyn puolesta on nykyään paljon tieteellistä näyttöä. Yhtenä pääsyistä pidetään vähäistä tietämystä ihmisten ja teknologian välisestä kanssakäymisestä kokoonpanotyössä ja tämän vaikutuksesta laatuun ja tuottavuuteen (Falck & Rosenqvist, 2014).

3.2 Ergonomia ja tuottavuus

Suunnittelevat insinöörit eivät aina ymmärrä seurauksia, kun suunnitellaan tuotetta tai työpistettä vähäisellä ymmärryksellä ergonomiasta kiireen alaisena. Ongelmat voitaisiin välttää oikein toteutetulla ennakoivalla suunnittelulla. Ongelmana on kuitenkin se, että ennakoivan suunnittelun positiiviset vaikutukset nähdään vasta vuosien päästä (Broberg 1997, s.325).

Ruotsalaiseen autoteollisuuteen tehdyn tutkimuksen mukaan 60–70 % tuki- ja liikuntaelinten sairauksista johtuu tuotteen suunnittelusta ja 30–40 % kokoonpanoprosessista. Tuotteen suunnittelusta johtuva ongelma voi olla esimerkiksi liian suuret kokoonpanovoimat johtuen huonoista varusteista tai liian tarpeettoman tiukoista sovitteista. Kokoonpanoprosessiin liittyvät ongelmat voivat olla esimerkiksi huonot työpisteiden korkeudet. Seurauksina näistä voi olla terveysongelmia ja tuotteiden huono laatu, joka lopulta johtaa tuotteen valmistuksen suurentuneina kustannuksina. Kustannukset koostuvat esimerkiksi huonosta kokoonpantavuudesta, viallisista tuotteista, ja väärin asennettujen kappaleiden korjaamisesta. Kuvassa 5 on esiteltynä tutkimuksessa esitettyjä havaintoja autoteollisuudesta (Falck et al. 2010, s.25).



Kuva 5 Seuraukset huonosta tuotteen ja prosessin suunnittelusta ergonomian näkökulmasta. Mukailtu lähteestä (Falck et al. 2010, s.26)

3.3 Ergonomian ja laadun yhteys

Ihmisten ja työympäristön vuorovaikutuksesta on useita tutkimuksia, jotka osoittavat selkeän yhteyden ihmisen suorituskyvyn ja vallitsevan ympäristön välillä. Suorituskykyyn vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa valaistus, ääni, tärinä, kemikaalit ja ympäröivät olosuhteet. Useissa tutkimuksissa on havaittu virheiden määrän kasvaneen, kun käytössä on ollut sopimaton valaistus. Yleisesti asiaa on tutkittu esimerkiksi lukemalla tekstejä huonossa valaistuksessa. Valmistavassa teollisuudessa on havaittu, että parantuneella valaistuksella on ollut merkittävä positiivinen vaikutus viallisten tuotteiden ja jätteen määrään (Smith & Jones 1992, s.3; Eklund 1999, s.145).

Melu voi kasvattaa virheiden määrää häiritsemällä keskittymistä yleisesti ja vaikuttamalla oleellisen vasteen saamiseen prosessista. Eräänä esimerkkinä on tilanne, joissa asennetaan komponentteja, joissa on ”snap-on”- kiinnitys. Oikein asennettu kappale päästää tietyn äänen, jolla voidaan varmistua, että kappale on asennettu oikein. Melussa oleellinen tieto voi kuitenkin peittyä ja palautteen saaminen ihmisen tietoon vaikeutuu. Tämä johtaa asennusvirheisiin (Eklund 1999, s.145–146).

Vartalon liikkeiden tarkkuus riippuu liikkeen suunnasta ja käytetyistä lihaksista. Ergonominen suunnittelu, jossa tämä huomioidaan, johtaa parempaan tarkkuuteen suorituksessa. Asentajan havaitsemat epämukavuudet ja kivut aiheutuvat usein raskaista ja toistuvista työtehtävistä. Ne ovat osoituksena liian kuluttavasta suoritteesta (Grandjean & Kroemer 1997, s.140–141).

Esitetyt tapaukset ovat eräitä esimerkkejä, jotka tukevat seuraavaa yleistettyä väitettä: ympäristön ja fyysisten olosuhteiden aiheuttama epämukavuuden tunne on vaikutuksessa laatuvirheisiin ja puutteisiin. Eräs selitys on se, että epämukavuuden tunne voi aiheuttaa keskittymisen heikentymistä tai vaihtoehtoisia ärsykkeitä, jotka kilpailevat tehtävän suoritteen kanssa. Muita vaihtoehtoja ovat esimerkiksi heikentynyt havainnointi, näkemisen rajoittuneisuus tai epäsuotuisista työolosuhteista aiheutuva työmotivaation aleneminen (Eklund 1997, s.985).

Vielä vuosituhannen vaihteessa ihmisten ja teknologian välisen kanssakäymisen vaikutuksista tuotannon laatuun ei ole ollut merkittävästi näyttöä. Myöhemmin on kuitenkin huomattu, että varsinkin lyhyen työkierron kokoonpanolinjat voivat olla ongelmallisia. Tilanteet, joissa työntekijä ei pysty kontrolloimaan syötettävien kappaleiden nopeutta, johtaa helposti keskeneräisiin tuotteisiin ja pakonomaiseen pyrkimykseen pysyä tahdissa. Toistuvat työtehtävät altistavat tylsistymiselle ja väsymiselle, mikä johtaa kasvaneeseen virheiden määrään. Teknologia, joka esittää informaatiota operaattoreille voi johtaa parantuneisiin tuloksiin käyttäjän tekemien päätösten laadussa (Eklund 1999, s.146).

On yleisesti tiedostettua, että tuotteiden suunnittelulla on merkittävä vaikutus valmistusaikoihin, ulostulon laatuun ja kokoonpantavuuden helppouteen. Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että ergonomisesti suunnitellut tuotteet parantavut tehokkuutta. Seuraavien asioiden huomiointi on osoittautunut oleelliseksi laadun näkökulmasta (Falck et al. 2014b, s.457):

- Mahdollisten tapojen määrä suorittaa tehtävä
- Yksityiskohtien ja osatoimintojen määrä
- Tehtävään kuluva aika
- Komponenttien asennusasento
- Hankalat asennuspaikat (estetty pääsy tms.)
- Näköeste tehtävän suorittamisessa
- Huono ergonomia
- Kokeneelle käyttäjälle suoritettujen tehtävien määrä
- Tehtävä on suoritettava tietyssä järjestyksessä
- Sovitteiden ja toleranssien visuaalinen tarkastus, eli tieto perustuu arvioon
- Tarkkuutta vaativien tehtävien määrä
- Säädön tarpeen välttäminen
- Sovitteiden erilaisuus eri tuotteiden välillä, eli tuntuma vaihtelee
- Pehmeiden ja joustavien materiaalien käyttö
- Välittömän palautteen puute onnistuneesta suorituksesta. Esimerkkinä napsahduksen puute tai referenssipiirteiden puute.

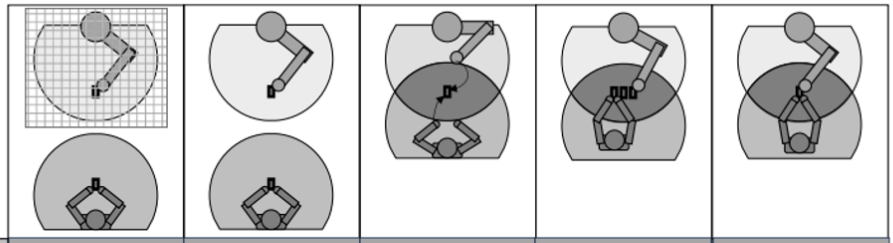
3.4 Teknologian ja ergonomian yhdistäminen kokoonpanotyössä

Teollinen yhteistyörobotiikka on yksi tärkeimmistä kyberfysikaalisista mahdollisuuksista neljännessä teollisessa vallankumouksessa. Ihmisen ja robotin välisen kanssakäymisen tarkoituksena on yhdistää automaation tuoma voima ihmisten uniikin osaamisen kanssa. Ihmisten ja robottien jakamalla työasemalla pyritään parantamaan käyttäjien työolosuhteita ja kasvattamaan tuotannon suorituskykyä samanaikaisesti. Yhteistyörobotiikan oikein toteutetulla sovelluksella voidaan saada tuettua ihmisen työskentelyä niin hyvin, että

sen voidaan katsoa olevan malliesimerkki käyttäjäkeskeisestä suunnittelusta. Yhteistyörobotiikka keskittyy siihen, että käyttäjän työolosuhteet ovat tärkein elementti tuotannossa. Tämä toteutetaan parantamalla ihmisten hyvinvointia, käyttäjäkokemusta, kestävyyttä, saavutettavuutta ja estämällä negatiivisia vaikutuksia käyttäjän terveyteen, turvallisuuteen ja suoritukseen samanaikaisesti (International Organization for Standardization 2019, s.42).

Kuvassa 6 on esiteltynä yhteistyön eri tasoja ihmisen ja robotin välillä. Mahdollisia yhteistyön tasoja on aitaus, rinnakkaiselo, synkronointi, yhteistoiminta sekä yhteistyö. Aidattu operaatio on esittämässä perinteistä turva-aidattua operaatiota, jossa teollisuusrobotti suorittaa tehtäviä itsenäisesti. Muut esitetyt tapaukset esittävät loppuja yllä mainituista tapauksista, joita sovelletaan usein yhteistyörobotiikassa (Petzoldt et al. 2022, s.3). Teoksissa (Wang et al. 2019) & (Matheson et al. 2019, s.2) on esitetty seuraavia selitteitä kuvaamaan yhteistyörobottien toimintaa eri tasoilla:

- Yleinen tapa on rinnakkaiselo (engl. coexistence), missä robotti ja ihminen on sijoitettuna samaan tilaan, mutta työtiloissa ei ole päällekkäisyyttä. Toisin sanoen ihmisen ja robotin välillä ei ole suoraa kontaktia. Koottavaa kappaletta saatetaan siirtää tilasta toiseen, mutta prosessi suoritetaan itsenäisesti sekä samanaikaisesti.
- Synkronisointi (engl. synchronization) toteutuu siinä tapauksessa, jos ihminen ja robotti jakavat saman työtilan. Toinen osapuolista johtaa toista ja fyysistä kanssakäymistä voi tapahtua. Sekä ihminen, että robotti työskentelevät saman tehtävän parissa ja suoritus tapahtuu vaiheittain.
- Yhteistoiminnassa (engl. cooperation) toimii sekä robotti, että ihminen, joilla on oma autonomia, pyrkimykset ja tavoitteet. Molemminpuolisen hyödyn toivossa yhteistyötä tekevät osapuolet voivat hetkellisesti jakaa joitakin fyysisiä, kognitiivisia tai laskennallisia resurssejaan. Siitä huolimatta, että heillä on kuitenkin omat tavoitteensa. Osapuolet jakavat osittain päällekkäisen työtilan, mutta suora kontakti ei ole tyypillistä niiden välillä. Ne voivat toimia yhtäaikaisesti, mutta toisinaan ne joutuvat odottamaan toista osapuolta.
- Yhteistyö (engl. collaboration) on ihmisen ja robotin välistä toimintaa jaetussa tilassa. Tavoitteena on saavuttaa yhdessä sarja annettuja tehtäviä. Tyypillisesti se vaatii koordinoitua ja samanaikaista toimintaa kaikilta osapuolilta. Fyysinen kontakti osapuolten välillä on tavanomaista.



	Aitaus	Rinnakaiselo	Synkronisointi	Yhteistoiminta	Yhteistyö
Työvaiheet	Peräkkäiset				Samanaikaiset
Työtila	Erilliset työtilat		Jaettu työtila – väliaikainen erotus	Jaettu työtila	
Työtehtävä	Erilliset työtehtävät		Yhdistettyjä tehtäviä		Jaetut tehtävät
Fyysinen kontakti	Ei mahdollinen		Mahdollinen, ei vaadittu		Mahdollinen, usein toivottu
DIN EN ISO 10218-1 mukaiset minimivaati-mukset	Automaattinen tila suojattu	Turvavalvottu pysäytys	Nopeuden ja etäisyyden valvonta		
			Voimanrajoitus		
				Visuaalinen signaali yhteistyötilassa	
					Käsiohjaus
Robotin nopeus	Maksiminopeus	Rajoitettu nopeus			

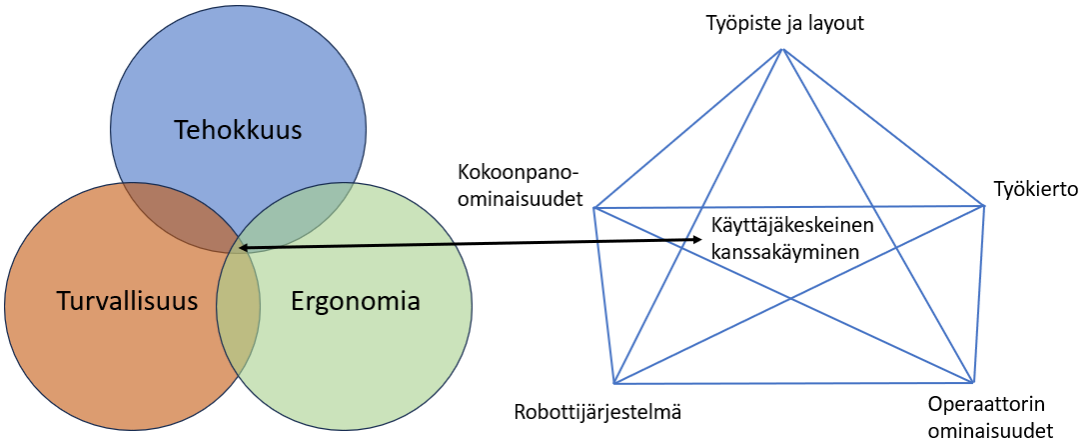
Kuva 6 Erilaisia yhteistyörobottien sovelluksia. Mukailtu lähteestä (Petzoldt et al. 2022, s.4)

Automaation lisääntymisen myötä on ilmennyt uudenkaltaisia ongelmia työympäristössä. Yksi haastavimmista tavoitteista on se, että kuinka automaatiolla todellisuudessa parannetaan työolosuhteita. Tähän liittyen on alkanut ilmestyä enemmän kirjallisuutta, joka on alkanut painottamaan työntekijöiden hyvinvoinnin tarvetta työpaikalla. Tarkastelun alla on sekä henkinen hyvinvointi, että fyysinen hyvinvointi sekä näiden yhteisvaikutus tehokkuuteen ja suorituskykyyn. Viimevuosina on havaittu merkittävää muutos johtamistavassa. Se on muuttumassa valmistusaikojen ja -metodien tarkastelun sijaan yhä enemmän ihmiskeskeiseen näkökulmaan. Tämän tuloksena teknologian ja automaation nähdään enemmänkin käyttäjiä tukevana ominaisuutena, ei käyttäjiä korvaavana ominaisuutena. Eräs tämän hetken pääsovelluksista tällä saralla on yhteistyörobotiikka (Gervasi et al. 2023, s. 1213).

Yhteistyörobottien käyttö työasemilla avaa paljon mahdollisuuksia, mutta tämän lisäksi siihen liittyy haasteita. Haasteet liittyvät erityisesti työterveyteen, turvallisuuteen ja työn organisointiin. Kokoonpanopisteen suunnittelun näkökulmasta kriittiset asiat voisivat olla seuraavat (Gualtieri et al. 2020):

- Kuinka varmistaa käyttäjien työturvallisuus?
- Kuinka suunnitella ja optimoida ihmisen ja robotin käyttöä kokoonpanotehtävissä?

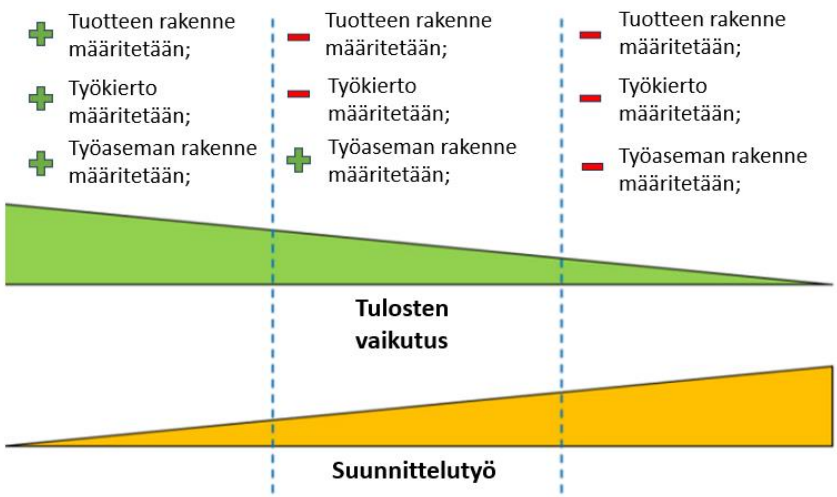
Parhaan tuloksen saavuttamiseksi ihmisen ja robotin jakama työasema tulisi suunnitella niin, että tuotteen ja prosessin suunnittelu tapahtuu samanaikaisesti. Samanaikaisella suunnittelulla pystytään vaikuttamaan kokoonpanoprosessiin paremmin, jolloin lopputuloksesta saadaan käyttäjäkeskeisempi. Toisiinsa liittyvien vaatimusten ja niiden asettamien haasteiden ratkaiseminen on helpompaa suunnitteluvaiheessa kuin olemassa olevalle tuotteelle (Winner et al. 1988). Ihmisen ja robotin välisen kanssakäymisen suunnittelun olennaisia huomioita käyttäjäkeskeisestä näkökulmasta on esitettynä kuvassa 7



Kuva 7 Olennaisia asioita ihmisen ja robotin välisessä kanssakäymisessä. Mukailtu lähteestä (Gualtieri et al. 2020, s.368)

Suunniteltaessa uutta ihmisen ja robotin välistä kokoonpanoasemaa, on tilanne yksi alla olevista. Erilaisten tilanteiden suhdetta suunnittelutyön määrään on havainnollistettu kuvassa 8 (Gualtieri et al. 2020, s.368):

- Suunnitellaan uusi työasema hyödyntäen olemassa olemaa työasemaa. Tämä tarkoittaa, että tuotteen piirteet ja näihin liittyvät sykli on jo määritettynä.
- Suunnitellaan uusi työasema aloittaen se täysin alusta. Tuotteen piirteet ja näihin liittyvä sykli on jo määritettynä
- Suunnitellaan uusi työasema aloittaen se kaikilta osin täysin alusta



Kuva 8 Suunnittelutyön määrä eri lähtötilanteiden mukaan. Mukailtu lähteestä (Gualtieri et al. 2020, s.368)

Vielä tänä päivänä tilanne on usein se, että teollisuusrobotit ovat raskaita koneita, jotka on erotettu turvallisuussyistä ihmisistä aitauksien avulla. Ne on ohjelmoitu työskentelemään autonomisesti ja seuramaan ennalta määritettyä ohjelmaa, jossa suoritetaan raskaita ja usein toistuvia tehtäviä. Robotteja sovelletaan usein kokoonpanolinjoilla, mutta esimeriksi näppäryyden puutteen vuoksi osa tehtävistä jää ihmisten vastuulle. Useissa tapauksissa ihmisten tulee työskennellä ergonomisesti vaativissa asennoissa, joka johtaa työtapaturmiin ja työstä aiheutuviin rasitusvaivoihin. Ihmisen heikkouksiin kuuluu tämän lisäksi myös alttius virheille. Varsinkin jos tuotteesta on useita eri variaatioita (El Makrini et al. 2017, s.1624).

Viime vuosien kasvavana trendinä sekä tutkimuspuolella, että teollisuudessa on ollut kehittää yhteistyörobotteja. Yhteistyörobotilla ts. cobotilla tarkoitetaan robottia, joka työskentelee vuorovaikutuksessa ihmisen kanssa. Yhteistyörobottien soveltamisen tarkoituksena on valjastaa robotit tekemään puuduttavat ja vaaralliset tehtävät. Tämän avulla saadaan vähennettyä raskaasta työstä aiheutuvia tuki- ja liikuntaelinten sairauksia, jotka vaivaavat miljoonia työntekijöitä ympäri maailmaa ja ovat yrityksille iso kuluerä (El Makrini et al., 2017, s.1624).

Ihmisen ja robotin yhteistyö (Human-robot collaboration, HRC) on prosessi, jossa automaation avulla tuetaan ihmisen suorittamista eniten toistuvissa ja rasittavissa toiminnoissa. Samaan aikaan ihmiset kompensoivat robotin jäykkyyttä joustavuudellaan ja näppäryydellään. Yksi HRC:n soveltamisen suurimmista haasteista on toteuttaa järjestelmiä, joissa kanssakäyminen on sujuvaa ja luonnollista (Gervasi et al. 2023, s.1214).

4. AUTOMATISOITAVUUS

Kappaleessa kartoitetaan merkittäviä asioita, joita tulisi huomioida kokoonpanon automatisoinnissa. Tarkoituksena on kerätä oleellisia ohjeistuksia sekä perusteluita sille, että missä tilanteessa automaation käyttöä voidaan pitää perusteltuna. Aiemmin tässä työssä on jo todettu kokoonpanon suunnittelun olevan yksi merkittävimmistä tekijöistä, kun harkitaan kokoonpanon automatisoimista. Tämän vuoksi sitä ei enää käsitellä tässä kappaleessa, vaikka se vaikuttaakin merkittävästi tuotteen automatisoitavuuteen.

Aloitetaan määrittelemällä mitä automaatiolla tarkoitetaan, sillä termiä käytetään useilla eri tavoilla eri asiayhteyksissä. Teos (Parasuraman et al. 2000, s.287) sisältää määrittelyn automaatiolle seuraavasti:

1) Tuotteen valmistuksen automaattista ohjausta useiden peräkkäisten vaiheiden läpi

2) Automaattisen ohjauksen soveltamista mihin tahansa teollisuuden- tai tieteenalaan

3) Elektronisten tai mekaanisten laitteiden soveltamista ihmisen tekemän työn korvaamiseksi.

4.1 Syitä automatisoinnille

Syitä automatisoinnille voidaan katsoa eri perspektiiveistä. Perspektiivinä voi olla yrityksen perspektiivi tai sitten tuotantosysteemin suunnittelijan perspektiivi. Tuotantosysteemin suunnittelija kiinnittää erityistä huomiota ihmiskeskeisiin päätöksiin automatisoidessaan prosessia. Osa syistä on yrityksen perspektiivistä, jossa tuottavuus on pääkohteena ja osa on tuotantosysteemien suunnittelijoiden näkökulmasta. Taulukossa 2 on esiteltynä havaittuja syitä. On kuitenkin olemassa lukuisia tilanteita, missä manuaalinen työ on suositeltavampaa. Tämänlaisia ovat esimerkiksi seuraavat tilanteet: kokoonpantava tuote on liian monimutkainen valmistaa koneen avustuksella tai tuotteen elinkaaren ennuste on lyhyt ja markkinoiden nopean kysynnän muutoksen vuoksi (Lindström and Winroth, 2010, s.150).

Taulukko 2 Syitä automaation käyttöönotolle. Mukaillen lähteitä (Groover 2001, s.13–14) & ***(Lindström & Winroth 2010, s.150)***

1	Tuottavuuden lisääminen	**8**	Manuaalisesti mahdottomien prosessien suorittaminen
2	Kustannuksien alentaminen	**9**	Automatisoimattomuudesta aiheutuvien suurien kulujen välttäminen
3	Työvoimapulan vaikutuksien lieventäminen	**10**	Vaarallisten töiden korvaaminen
4	Rutiininomaisten tehtävien vähentäminen tai poistaminen	**11**	Epämiellyttävien töiden korvaaminen
5	Työntekijän turvallisuuden lisääminen	**12**	Ihmisen kapasiteetin laajentaminen
6	Tuotteen laadun parantaminen	**13**	Tekniset ominaisuudet
7	Valmistusaikojen lyhentäminen		

Kokoonpano on usein osa-alue, jossa manuaalisen työn osuus on suurin. Ihmisten ja teknologian tulee toimia yhteistyössä yksinkertaistaakseen työtä ja tehdäkseen kokoonpanosysteemin tehokkaammaksi ja tuottavammaksi. Yritysten täytyy hankkia syvää ymmärrystä uusista tuotantoratkaisuista, jotta saadaan toteutettua pitkäaikainen ja kestävä systeemi (Fasth-Berglund & Stahre 2013, s.296). Yhtenä ehkäisevistä seikoista ihmisen poistamiselle järjestelmistä on niiden joustavuus, adaptoituvuus, ja luovuus automaatioon nähden. Tämän lisäksi ihmisten on havaittu vastaamaan paremmin muuttuviin ja ennalta-arvaamattomiin olosuhteisiin (Parasuraman & Riley 1997, s.232).

4.2 Automaation taso

Ihmisten ja teknologian integroimisen tärkeyden on tiedostettu tukevan kestäviä valmistusjärjestelmiä. Ennen vuosituhannen vaihdetta tehdyt tutkimukset yhdysvaltalaisista yrityksistä tutkivat inhimillisen puolen huomioimista toteuttaessa automaatiota. Tasapainoinen ja kokonaisvaltainen lähestymistapa tekee helpommaksi löytää sopivan automaation tason parhaan suorituskyvyn saavuttamiseksi. Ihmisen ja teknologian välisen suhteen voidaan ajatella olevan jatkumo täysin manuaalisesta täysin automatisoituun. Kun tämä jatkumo jaetaan osuuksiin ihmisen ja teknologian tekemän työn perusteella, saadaan automaation tasot (Levels of automation, LoA) (Fasth-Berglund & Stahre 2013, s.295).

Empiiriset havainnot ovat osoittaneet korrelaation korkean automaation tason ja lisääntyneen monimutkaisuuden välillä. Valmistusstrategioiden tutkimisessa on tullut ilmi, että automaatioon liittyvät päätökset ovat yleensä pikemminkin tapauskohtaisia kuin tarkoin suunniteltuja. Esimerkiksi automaation taso määritellään tuotteittain riippuen tuotantomääristä, eikä päätöksiä ohjaa tukijärjestelmä (Lindström & Winroth 2010, s.149).

Massaräätälöinti kuormittaa tässä aiheessa tuotteen sekä järjestelmien suunnittelijoita. Markkinoilla on teknisiä ratkaisuita sekä menetelmiä kokoonpanon automatisoinnin tueksi. Jos yritys haluaa pysyä mukana kilpailussa, on oltava valmis adaptoitumaan tulevaisuuden muutoksiin ja trendeihin sekä makro, että mikrotasolla. On kuitenkin tärkeää muistaa, että on kallista investoida resursseihin, joita ei käytetä niiden täydellä potentiaalilla. Tällöin oikeanlaisen mekaanisen ja kognitiivisen automaation tason määrittäminen on tärkeää, jotta voidaan välttää yli- tai aliautomatisoidut systeemit. Tämä tarkoittaa sitä, että tehtävien jakaminen tulee määrittää sopivaksi resurssien (käyttäjät ja koneet) välillä. Tämä tulee toteuttaa niin, että allokointi on muokattavissa myös tulevaisuudessa (Fasth-Berglund & Stahre, 2013, s.295).

Automaation tasot jaetaan seuraavalla tavalla (Nof, 2009):

1. Kone ei avusta päätöksenteossa. Ihminen tekee päätökset.
2. Tietokone tarjoaa kaikki mahdolliset toimenpiteet
3. Ehdottaa muutamaa vaihtoehtoista suoritustapaa
4. Ehdottaa vaihtoehtoista tapaa
5. Suorittaa ehdotetun suorituksen, jos ihminen hyväksyy sen
6. Antaa ihmiselle mahdollisuuden peruuttaa autonominen suoritus ennen sen aloittamista

7. Suorittaa automaattisesti, informoi ihmistä tarpeen vaatiessa
8. Informoi ihmistä vain, jos ihminen kysyy informaatiota
9. Ihmistä informoidaan vain, jos tietokone päättää niin
10. Tietokone päättää kaiken, toimii autonomisesti

4.3 Tuotteen suunnittelu robotisoituun kokoonpanoon

Teoksessa (Scarr et al. 1986, s.796) on esitetty kokoonpanotyön jakautuvan 3 eri pääkategoriaan:

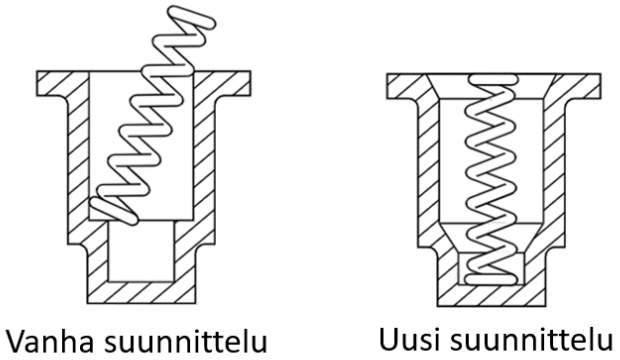
1) Manuaalinen kokoonpano

2) Robotisoitu kokoonpano

3) Automatisoitu kokoonpano

Tuotantomäärien perusteella ja työn luonteen vuoksi jätetään tässä kohtaa käsittelemättä tuotteen suunnittelu manuaaliseen kokoonpanoon sekä suurten tuotantomäärien automatisoiduille linjoille.

Kuten todettua, helpoin tapa sujuvoittaa kokoonpanotyötä on vähentää osien määrää niin pieneen kuin mahdollista. Suunnitellessa tuotetta automaatiota varten, on vieläkin tärkeämpää minimoida osien määrää. Osien määrän vähentämisellä voidaan parhaassa tapauksessa poistaa kokonaisia osioita kokoonpanoon sovellettavasta järjestelmästä. Sisältäen vaikkapa robotin työpään, mahdolliset kuljettimet ja jigit. Yksinkertaistamisen lisäksi ohjauksien ja viisteiden käytön merkitys kasvaa entisestään. Robottien tuntuma ei vastaa ihmistä, jolloin on entistäkin tärkeämpää, että palat ohjautuvat mahdollisimman itsenäisesti paikalleen (Boothroyd et al. 2010, s.200). Malliesimerkki tästä on estelty kuvassa 9:



Kuva 9 Viisteiden lisääminen kokoonpantavuuden helppouden parantamiseksi. Mukailtu lähteestä (Boothroyd 2005, s.274)

4.3.1 Layoutin vaikutus kokoonpanon suunnitteluun

Robotisoidun kokoonpanon tyypin valinta vaikuttaa useisiin tärkeisiin suunnittelunäkökohtiin, joihin vaikuttavat erilaiset tuotantoparametrit, kuten esimerkiksi kokoonpanon osien määrä ja tuotantomäärät. Tässä työssä esitellään kolmea edustetuinta tyyppiä: yksi asema ja yksi robotti, yksi asema kahdella robotilla sekä usean robotin linja ja tarvittavat manuaaliset kokoonpanoasemat (Boothroyd 2005, s.281).

Yhden aseman järjestelmille osat, jotka tarvitsevat manuaalista käsittelyä ja tulee asentaa keskellä kokoonpanosykliä ovat ongelmallisia. Turvallisuussyistä ne ovat usein pakollista siirtää kokoonpanoa varten pois robotin työskentelyalueelta. Erikoisvalmisteisten työpäiden käyttö asettamisen ja kiinnittämisen operaatioissa sisältää samankaltaisia ongelmia kuin manuaalinen kokoonpano. Ensimmäisenä kiinnitettävä kappale asetetaan runkokokoonpanoon, mutta sitä ei vielä kiinnitetä. Tätä seuraa vaihe, jossa kokoonpano joudutaan kuljettamaan kokoonpanosta ulkopuolisele asemalle kiinnittämistä varten. Esimerkkitapauksena kappaleiden kiinnittäminen prässillä. Toinen vaihtoehto asennukseen on integroida työpäähän työkalu, jonka avulla kiinnittäminen voidaan hoitaa liikuttamatta kokoonpanoa toiselle pisteelle. Nämä ovat ongelmia, jotka nousevat usein esiin yhden aseman kokoonpanoissa. Usean aseman kokoonpanoissa nämä toimenpiteet voidaan suorittaa yksinkertaisemmin niille suunnitelluilla työpisteillä. Työkalujen edullisuuden ja käytettävyyden parhaan tuloksen varmistamiseksi tulisi kokoonpanosysteemiä ja tuotetta suunnitella samanaikaisesti. (Boothroyd et al. 2010, s.207)

4.3.2 Vikaantumisten määrä

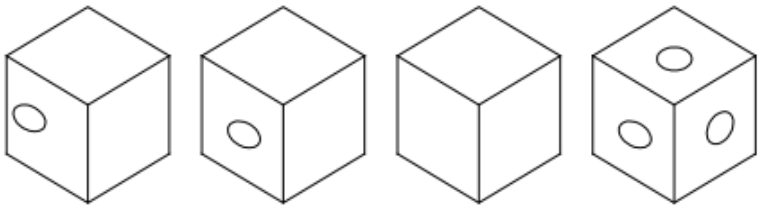
Hyödynnä standardiosia kokoonpanossa aina kuin se on käytännöllistä ja taloudellisesti järkevää. Täytyy kuitenkin muistaa, että kokoonpanon helppous ei ole aina saavutettavissa vain standardiosiin pohjautuvassa kokoonpanossa. Standardiosien laadun tulee vastata robotisoidun kokoonpanon vaatimuksiin (Scarr et al. 1986, s.798). Standardiosien tulee olla tarpeeksi luotettavia eliminoimaan ajoittamattomat koneen pysäytykset, jotka johtuvat ongelmista syöttimissä, tarttujissa tai kiinnitysoperaatioissa. Hyväksytty riskitaso päätetään arvioimalla laadukkaampien osien hintaa sekä kustannuksia, jotka johtuvat suunnittelemattomista pysähdyksistä (Eskilander 2003, s.168).

4.3.3 Orientointi ja syöttö

Suurimmat ongelmat sovellettaessa automaatioita ilmenevät yleensä automaattisessa osien käsittelyssä enemmin kuin niiden kiinnittämisessä kokoonpanoon. Tästä voidaan tehdä havainto, että suunniteltaessa tuotetta automatisoitua kokoonpanoa varten on erityistä huomiota kiinnitettävä automaattiseen syöttöön ja kappaleen suuntaamiseen (Boothroyd et al. 2010, s.185).

Osien suunnittelussa tulee pyrkiä symmetriaan. Jos symmetrisen kappaleen valmistus ei ole mahdollista, on osasta tehtävä selkeästi epäsymmetrinen. Tällä tavoin osan piirteiden tunnistaminen helpottuu ja sen helppo orientointi on mahdollista. (Eteläaho et al. 1999, s.11).

Osat tulee suunnitella niin, että osa on mahdollista asentaa väärin niin vähillä tavoilla kuin mahdollista. Kuvassa 10 on esiteltynä havainnollistava esimerkki, kuinka reiän avulla tilanne muuttuu. Kuvassa vasemmalla sijaitsevassa vaihtoehdossa osa on mahdollista kokoonpanna oikein vain yksi kuution sivu edellä, tämän lisäksi myös vain yksi tietty reuna täytyy olla kohdillaan, jotta reikä osuu kohdalleen vastinkappaleessa. Seuraavassa esimerkissä reikä on porattu keskelle erästä sivua. Kuvitteellisessa satunnaispoiminnassa tilanne on jo hieman parempi, mutta todennäköisyys oikeaan asentoon on edelleen vain 1/6. Kaksi viimeistä palaa sen sijaan ovat helppoja kohdistaa ja todennäköisyys suunnata kappale oikein on 1/1 (Eskilander 2003, s.173).



Kuva 10 Esimerkki suunnittelun vaikutuksesta orientoimiseen (Eskilander 2003, s.173)

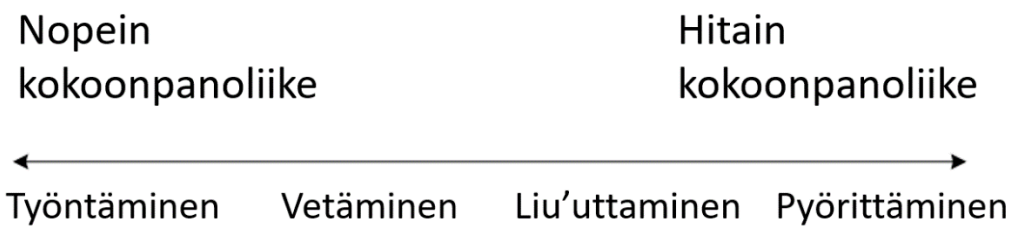
Osien kuljetuksen tapahtuessa automaattisilla syöttimillä, on varmistuttava, että osat voidaan orientoida yksinkertaisilla työkaluilla. Robotisoituun kokoonpanoon suunniteltaessa on tärkeintä, että kappaleen piirteet ovat mahdollisimman tunnistettavat, jolloin sen orientointi helpottuu. Keskittyminen siihen, että kappaleita voitaisiin käsitellä suurella nopeudella ei ole niin oleellista (Boothroyd et al. 2010, s.213).

4.3.4 Kokoonpanoliikkeet

Kaikki osat tulisi olla mahdollista asentaa yhdellä kädellä. Manuaalinen kokoonpano yhdellä kädellä on hyvä mittari havainnollistamaan automaattista kokoonpanoa (Eskilander 2003, s.177; Scarr et al. 1986, s.798). Pyri suunnittelemaan tuotteet niin, että ne olisi mahdollista kokoonpanna kerroksittain. Optimaalisessa tilanteessa kokoonpano voidaan toteuttaa kerroksittain yläpuolelta käsin (z-akseli kokoonpano). Tämä on yksinkertaisin, halvin ja helpoin tapa 4 vapausasteen roboteille suorittaa kokoonpanotehtävät (Boothroyd 2005, s.288).

Pyri välttämään keskeneräisen kokoonpanon sekä jo asennettujen osien uudelleen orientoimista. Nämä toiminnot kasvattavat kokoonpanoaikaa eivätkä ole arvoa lisäävää toimintaa. Jos keskeneräistä kokoonpanoa tarvitsee kääntää kesken prosessin se johtaa usein kalliimpien kokoonpanojigien suunnitteluun ja kalliimman 6 vapausasteen robotin käyttöön (Boothroyd et al. 2010, s.213).

Tavoittele mahdollisimman yksinkertaisia kokoonpanoliikkeitä, kun valitset kiinnitystapaa. Kuvassa 11 on esiteltynä erilaisia kokoonpanoliikkeitä ja verrattu niiden suorittamisten nopeutta. Useiden liikkeiden kombinaatioita samassa kiinnitystehtävässä on pyrittävä välttämään (Eskilander 2003, s.177).



Kuva 11 Kokoonpanoliikkeiden nopeuksien vertailu. Mukailtu lähteestä (Eskilander 2003, s.177)

4.3.5 Asettaminen ja kiinnitys

Kokoonpanoprosessin tulisi olla ”sandwich-mallinen”. Eli se etenee pala kerrallaan alhaalta ylöspäin. Parhaassa tilanteessa jokainen komponentti varmistaa kiinnityksen ilman lisäkiinnikeitä (Scarr et al. 1986, s.798). Yhdenkään osan, kiinnittimen tai minkään muun ei tule olla kokoonpanoprosessin esteenä. Tämä johtaa vaikeampiin liikkeisiin seuraavaa osaa asennettaessa, mikä johtaa pidempään kokoonpanoaikaan ja korkeampiin kustannuksiin (Eskilander, 2003, s.179).

Osien ja kiinnitystapojen vähentäminen voi johtaa siihen, että kokoonpanossa yritetään kiinnittää useampaa osaa samanaikaisesti paikalleen. Manuaaliseen kokoonpanoon ohjeistuksena on välttää prosesseja, joissa kaksi kättä ei riitä. Kuvitteellisessa kahta kättä vaativassa kokoonpanotilanteessa toinen käsi voi pitää tai säätää osia kohdalleen ja toinen tehdä liitoksen. Robottien kanssa on kuitenkin syytä muistaa suunnitella yksikätisiin tapauksiin, mitä robotit lähtökohtaisesti ovatkin (Lempiäinen & Savolainen 2003, s.73; Scarr et al. 1986, s.799).

Tappien reikään asettaminen ei ole ongelma ihmiselle manuaalisessa kokoonpanossa, koska me voimme käyttää aistejamme. Robotti sen sijaan täytyy ohjelmoida tähän tarkoitukseen, mikä vie aikaa. Yksinkertaisin vastaus tähän on helpottaa prosessia. Kaikki tappien reikään asettamiset tulee toteuttaa yhdellä suoralla liikkeellä ylhäältä alaspäin. Tämän lisäksi sekä asetettavaan osaan ja vastinkappaleeseen tulee tehdä pitkät viisteet. Kitkaa on syytä pyrkiä vähentämään hienolla pinnalla ja mahdollisimman väljillä sovitteilla (Eskilander 2003, s.180; Scarr et al. 1986, s.799).

Eskilanderin mukaan (Eskilander 2003, s.180) seuraavilla suunnittelun keinoilla voidaan parantaa robotisoidun systeemin käytettävyyttä tappien asettamisessa:

- Viistetyt reiät estävät ruuvin ensimmäisten kierteiden vaurioitumisen.
- Reiät, joissa on kartiomainen alku ovat hyvä vaihtoehto, sillä ruuvin ja reiän kartiomaisella osuudella voidaan ohjata ruuvi kohdalleen ennen kuin kierre alkaa tarttumaan.
- Vältä lyhyiden ruuvien käyttöä. Pidemmän ruuvin kohdistaminen on helpompaa laitteistolle.

Pitkät sovitteet ovat haastavia roboteille. Sovituksen ollessa tiukka, tarvitaan aputyökaluja tai kokoonpanopuristinta. Roboteilla tehtävä kokoonpanotyö rajoittuu tämänlaisissa tilanteissa rakenteisiin, joissa on hyvät viisteet, jotka ohjaavat voiman suuntaamista. Esimerkiksi SCARA-roboteissa on tarjolla mukautumiskykyä tarkkaan sijaintiin, jota voidaan hyödyntää tässä tilanteessa. Useimpiin muihin robotteihin mukautumiskykyä tarkkoihin sijainteihin voidaan tuoda voimansäätöinstrumentin avulla. Sovitteita asetettaessa tärkeintä on kuitenkin kappaleiden purseettomuus, sillä sovitteessa purse estää osien välisen liikkeen. (Lempiäinen & Savolainen, 2003, s.139)

5. KOKEELLINEN OSUUS

Tässä luvussa esitellään diplomityössä sovellettuja menetelmiä ja työvaiheita, joiden avulla päästiin luvussa 6 esitettäviin tuloksiin. Pääasiallisina menetelminä toimi kokoonpanon työntekijöille pidetty kyselytutkimus sekä ruuvikompressorille suoritettu kokoonpantavuuden tarkastelu, joka rakentuu DFA-ohjeistuksien ympärille.

5.1 Nykytilanne kokoonpanossa

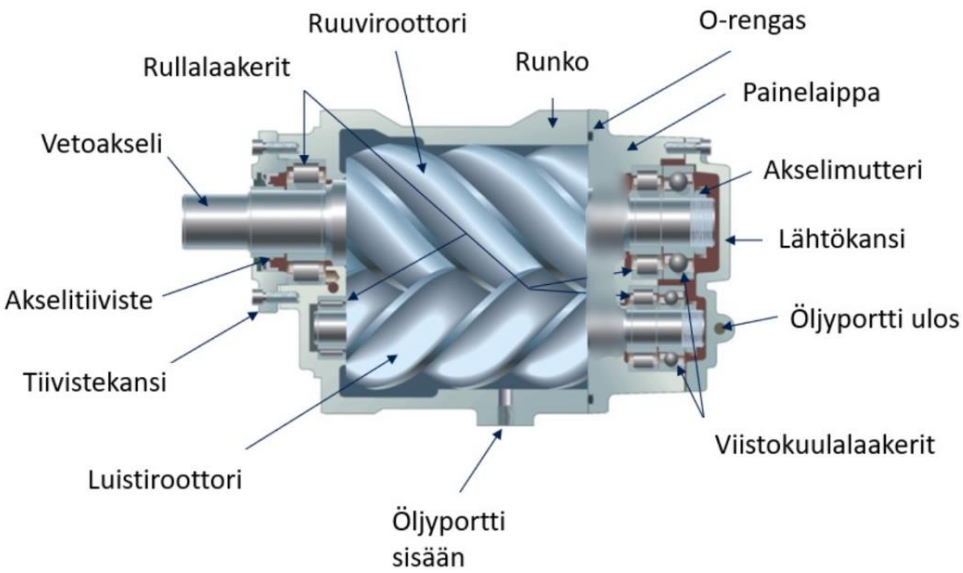
Tällä hetkellä E12 yksiköitä kootaan kolmessa eri kohteessa. Yksiköitä voidaan koota sekamallien kokoonpanolinjalla (MML, Mixed-Model Line) tai kahdella säädettävällä työtelineellä. Tarkasteltavana kohteena on toinen työtelineen ympärille rakentuvista työpisteistä. Tarkasteltava kokoonpano toteutetaan kuvassa 12 esitetyllä työpisteellä. Valtaosa kokoonpanosta tapahtuu työtelineellä. Teline on korkeussäädettävä ja sen suuntausta voidaan muuttaa työntekijälle sopivaksi.

Kuva 12 E12 yksikkö työtelineessä

Kokoonpanopisteellä tehtävä työ tapahtuu lähes täysin manuaalisesti. Kokoonpano sisältää toistuvia toimenpiteitä. Osa toimenpiteistä on käyttäjille raskaita ja niiden helpottaminen automaation avulla on osoittautunut kiinnostavaksi vaihtoehdoksi. Joihinkin vaiheisiin on teetetty kuormitusta helpottavia työkaluja ja apuvälineitä. Näiden soveltaminen

on kuitenkin vaihtelevaa, sillä useat työkaluista ja apuvälineistä ovat vaikeakäyttöisiä ja tällöin mielenkiinto niiden soveltamista kohtaan on laskenut.

Kuvassa 13 on esiteltynä kokoonpantavan ruuviyksikön rakenne. Rakenne on varsin yksinkertainen, mutta toimivan yksikön saaminen vaatii ammattitaitoa ja erityistä tarkkaavaisuutta. Jotkin kokoonpanoon kuuluvista osista ovat painavia ja niiden liikutteleminen on kuormituksen vuoksi haastavaa. Tämänlaisia osia ovat esimerkiksi yksikön runko, ruuviroottori, luistiroottori sekä painelaippa. Näiden osien käsittely on jo tiedostettu raskaaksi. Niihin liittyvien kysymysten sijaan kyselytutkimuksessa haluttiin kartoittaa muita kokoonpanon kuormittavia tekijöitä.



Kuva 13 Enduroyksikön rakenne (Tamrotor 2019)

Tehtaalle on suoritettu ergonomisia selvityksiä työterveyden toimesta. Selvitykset on tehty Tempest 12 ja Tempest 25 mallien kokoonpanoon, jotka sisältävät samankaltaisia työvaiheita kuin Enduro 12 yksiköiden kokoonpano.

Positiivisena asiana E12 kokoonpano sisältää korkeussäädettävän työtelineen, jossa suurin osa kokoonpanosta toteutetaan. Sitä pystyy säätämään sekä korkeussuunnassa ja sitä voi pyörittää. Tämä tarjoaa mahdollisuuden ergonomiseen työasentoon. Lisäksi kokoonpanopisteen ympäristössä on myös kattonosturi, jonka avulla voidaan nostaa painavat runkokappaleet ja roottorit.

Negatiivista on kuitenkin se, että E12 kokoonpanossa lavat eivät tule täysin pois hyllyjen alta. Tällöin painavia kappaleita kuten runkoa ja painelaippaa joutuu kurottelemaan pitkältä hyllyjen alta. Kyseisissä kurotuksissa altistutaan esimerkiksi alaselän sekä olkapään venähdysvammoille. Työvaihe kuormittaa myös niska-hartiaseutua sekä yläselkää

ja käsivarren lihaksia. Tilanne on täysin vastaava kuin kuvassa 14 esitetyssä Tempest-kokoonpanossa.

Kuva 14 Ergonominen haaste Tempest- kokoonpanossa

5.2 Selvitys työergonomiasta ja työolosuhteista

Tutkimusaineiston kerääminen aloitettiin sopimalla perehdytys E12 yksiköiden kokoonpanoon. Tarkoituksena oli kerätä tietoa kokoonpanolinjalla työskentelemisestä. Perehdytys toteutettiin työpäivän mittaisena E12 yksiköiden kokoonpanopisteellä, jossa ohjaajana toimi kokoonpanolinjalla työskentelevä kokenut käyttäjä. Perehdytys aloitettiin keskustelulla kokoonpanon ongelmakohdista. Tämän jälkeen käyttäjä kokosi normaalia työtahtiaan hitaammin 2 kappaletta yksiköitä ja selosti mitä kussakin työvaiheessa suoritetaan.

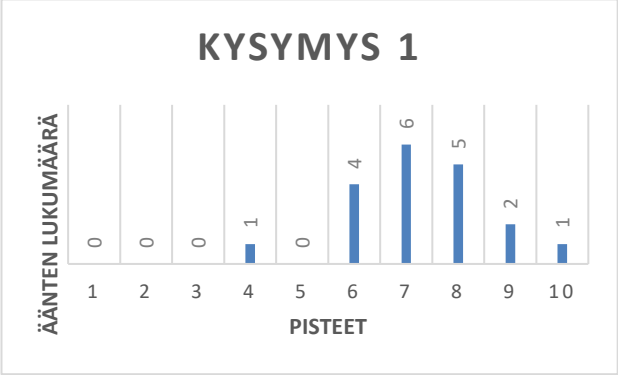
Seuraavana perehdytyksessä seurasi yksiköiden kokoonpano käyttäjän ohjeistuksella. Käyttäjä ohjeisti tarkasti jokaisen työvaiheen, jotta suoritus toteutuu täysin todellisen tilanteen mukaisesti. Tavoitteena oli koota 3 kappaletta E12 yksiköitä. Tarkoituksena oli saada hyvä muistijälki ja tuntuma tehtävästä kokoonpanotyöstä. Yksiköitä tapana on tehdä jopa 3 kappaletta kerrallaan, mutta tässä tilanteessa niitä päädyttiin kokoamaan yhtä kerrallaan selvyyden vuoksi. Perehdytys auttoi ymmärtämään kokoonpanon haasteita työergonomiaan ja -olosuhteisiin liittyen. Tämä oli hyödyllistä kyselyn suunnittelun kannalta. Kokoonpanopisteeltä tehtyjen havaintojen lisäksi keskustelut käyttäjän kanssa tukivat kysymysten suunnittelua ja kyselyn toteuttamista.

E12 ruuviyksikköjen perehdytyksen jälkeen valmisteltiin kyselytutkimus. Haastateltavana oli 19 käyttäjää, joiden kaikkien tuli vastata 6 kappaleeseen E12 kokoonpanoon liittyviä kysymyksiä. Kyselyyn osallistuivat kaikki sellaiset henkilöt, jotka ovat tällä hetkellä töissä kokoonpanolinjalla tai ovat työskennelleet siinä pitkään lähivuosien aikana.

Kysymyksissä kartoitettiin heidän näkemyksiään nykyisen kokoonpanolinjan työturvallisuuteen, ergonomiaan ja kehitystarpeisiin liittyen. Kysely toteutettiin 5.6.2023 Gardner Denverin Tampereen pisteen toimitiloissa. Se toteutettiin kahdessa ryhmässä. Ensimmäinen ryhmä koostui 9 henkilöstä ja toinen 10 henkilöstä. Ennen kyselyn suorittamista vastaajille kerrottiin kyselyn motiivi. Tämän jälkeen käyttäjille annettiin ohjeistus kyselystä vertailukelpoisten tulosten saamiseksi. Kysely suoritettiin yksilötehtävänä. Vastaajat eivät saaneet keskustella kyselyn aikana toistensa kanssa.

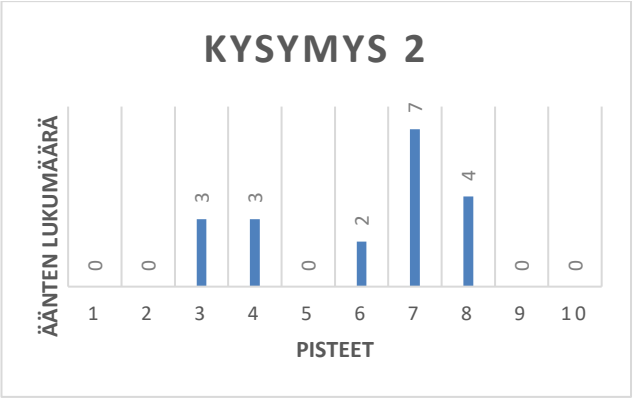
Alla on esiteltynä saatuja tietoja, joita saatiin haastattelemalla yhteensä 19 kokoonpanon entistä tai nykyistä työntekijää. Kysymyksissä kartoitettiin heidän näkemyksiään nykyisen kokoonpanolinjan työturvallisuuteen, ergonomiaan ja kehitystarpeisiin liittyen.

Kyselyn ensimmäisessä vaiheessa kartoitettiin käyttäjien tämänhetkistä tyytyväisyyttä kokoonpanoprosessiin. Vastaaminen tuli suorittaa työolosuhteiden ja työn kuormittavuuden näkökulmasta. Käyttäjien tuli arvioida kokoonpanoa väliltä 1–10. Arvosana 10 tarkoitti, että käyttäjä on täysin tyytyväinen kokoonpanoon. Saadut arvot ovat esiteltynä kuvassa 15.



Kuva 15 Käyttäjien tyytyväisyys kokoonpanoprosessiin

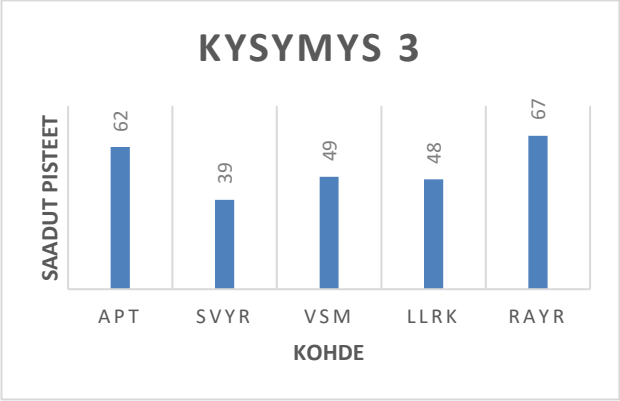
Seuraavassa vaiheessa käyttäjät arvioivat E12 yksikön kokoonpanoprosessin ergonomiaa. Vastaaminen kysymykseen toteutettiin samalla periaatteella kuin kysymyksessä 1. Arvosana 10 kuvastaa, että kokoonpano on ergonomisesti liian kuormittava. Arvosana 1 tarkoittaa ei lainkaan kuormittavaa. Kuvassa 16 on esitetty, että jopa noin 58 % prosenttia vastaajista on antanut kokoonpanon kuormittavuuden arvoksi 7 tai enemmän. Saatuja arvoja voidaan pitää merkittävänä perusteena raskaiden prosessien automatisoinnille kokoonpanotyössä.



Kuva 16 Kokoonpanon ergonominen kuormittavuus

Vaiheessa 3 käyttäjät arvioivat kunkin prosessin kehitystyön tarvetta. Pisteytys toimi seuraavalla tavalla: Vastaajalle oli esitettynä viisi prosessin työvaihetta. Vastaajan piti jakaa arvosanat 1–5 näiden vaihtoehtojen kesken. Samaa lukemaa ei saanut käyttää kuin kerran. Arvojen laskennassa kunkin työvaiheen saamat pisteet on summattu yhteen ja arvot on esitetty kuvassa 17. Kuvissa 17, 18, 19 ja 20 esitettyjen kokoonpanoprosessin eri vaiheiden lyhenteet tarkoittavat seuraavaa:

1. Akselitiivisteiden puristaminen tiivistekanteen (APT)
2. Sokkien vasarointi yksikön runkoon (SVYR)
3. Välyksen säätö ja mittaus (VSM)
4. Laakereiden lyöminen runkoon/kansiin (LLRK)
5. Roottoreiden asettaminen yksikön runkoon (RAYR)

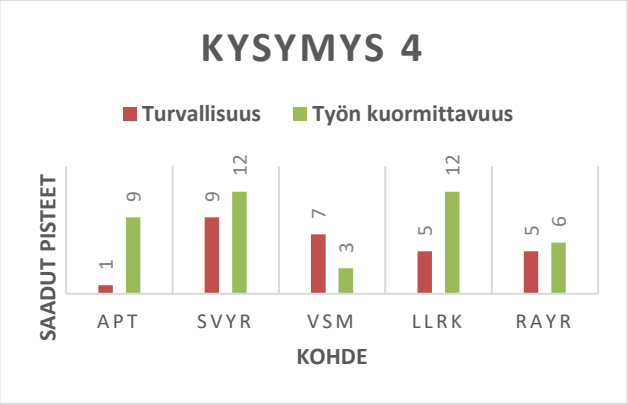


Kuva 17 Prosessin kehittämisen tarve

Neljännessä vaiheessa kartoitettiin syytä, minkä vuoksi kohdetta olisi syytä kehittää. Vaihtoehtoina oli työturvallisuuden näkökulma sekä työn kuormittavuuden näkökulma. Vastaajat ympyröivät kunkin listatun prosessin kohdalta ne näkökulmat, jotka he kokivat tarpeellisiksi kohteelle. Jos vastaaja oli sitä mieltä, että vaihtoehdot eivät ole kuvaavia,

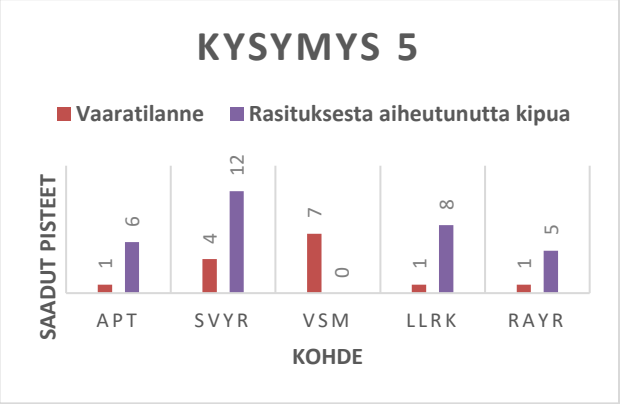
he eivät ympyröineet mitään. Kuvassa 18 on esitettynä saadut arvot. Molemmat lyömistä vaativat prosessit saivat eniten ääniä.

Noin 63 % vastaajista oli sitä mieltä, että sokkien vasaroiminen yksikön runkoon sekä laakereiden lyöminen runkoon ja kansiin vaatisi kehitystyötä työn kuormittavuuden näkökulmasta. Lisäksi noin 47 % prosenttia vastaajista koki, että sokkien vasarointia olisi kehitettävä myös työturvallisuuden näkökulmasta.



Kuva 18 Kehittämisen syy

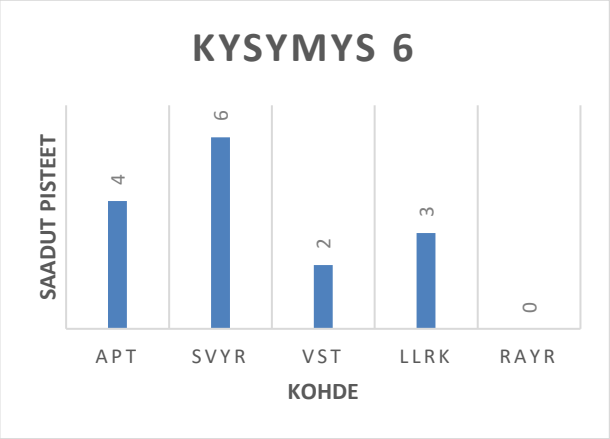
Kysymyksessä 5 kartoitettiin, onko käyttäjille sattunut vaaratilanteita (myös vähäiset) tai rasituksesta aiheutunutta kipua. Jopa 63 % vastanneista ilmoitti, että he ovat kokeneet rasituksesta aiheutunutta kipua asentaessaan sokkia yksikön runkoon. Myös toinen vasarointia vaativa toimenpide eli laakereiden lyöminen on aiheuttanut rasituksesta aiheutunutta kipua 42 % vastaajista. Huolestuttava lukema on myös välyksensäädön vaaratilanteiden määrä. Jopa noin 37 % vastaajista on kokenut vaaratilanteen välyksensäädössä. Saadut arvot ovat esitettynä kuvassa 19. Vaaratilanteiden aiheuttajasta on kerrottu lisää luvussa 5.3.7.



Kuva 19 Työvaiheiden aiheuttamien ongelmien kartoitus

Viimeisessä kysymyksessä kartoitettiin vastaajien mielipidettä automatisointia kohtaan. Käyttäjiltä kysyttiin tulisiko heidän mielestään jokin työvaiheista automatisoida, kun asiaa

tarkastellaan työolosuhteiden ja työn kuormittavuuden näkökulmasta. Käyttäjät saivat merkitä 1 kappaleen toimenpiteitä, jolle se olisi heidän mielestään kaikista oleellisinta. Mitään vaihtoehdoista ei ollut pakko valita. Saadut arvot on esitetty kuvassa 20. Noin 31,5 % oli sitä mieltä, että sokkien vasarointi yksikön runkoon tulisi automatisoida. Seuraavaksi eniten ääniä saivat akselitiivisteiden puristaminen tiivistekanteen noin 21 %, sekä laakereiden lyöminen kansiin/runkoon noin 16 %.



Kuva 20 Automatisoinnin kartoituksen tulokset

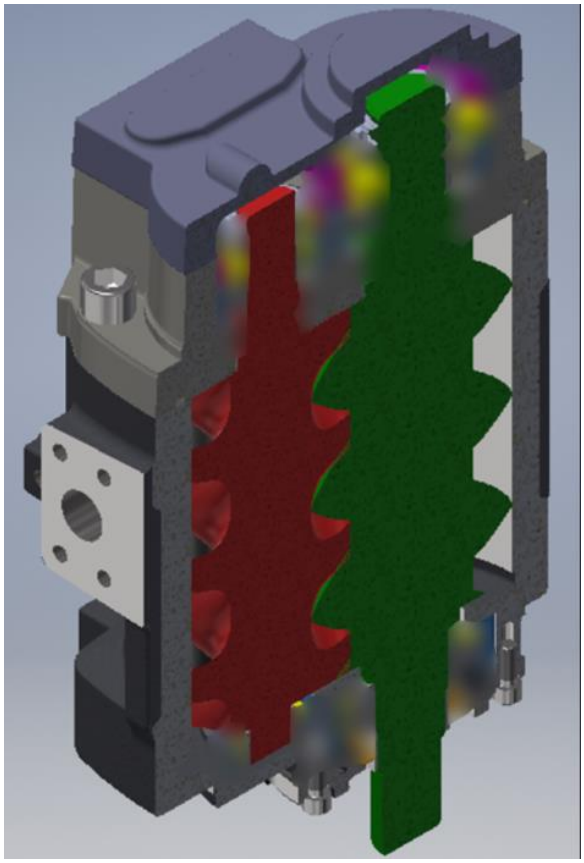
Annettujen vastausvaihtoehtojen lisäksi käyttäjillä oli mahdollista lisätä myös muita työvaiheita ja ilmoittaa kokemistaan ongelmista kokoonpanoon liittyen. Listan ulkopuolisia työvaiheita ei ilmoitettu merkittävästi. Useat vastaajat ilmoittivat kuitenkin tyytymättömyytensä nykyiseen kokoonpanotelineeseen. Ilmoittajat kokivat nykyisen telineen vaivalloiseksi ja toivoivat sen modernisointia.

5.3 Kokoonpantavuuden tarkastelu

Diplomityössä kuvassa 13 esitetylle Enduro 12 mallille suoritetaan kokoonpantavuuden tarkastelu. Tässä tapauksessa hyödynnetään DFA- menetelmissä esitettyjä suosituksia. Tarkoituksena on tarkastella osan tarpeellisuutta, kokoonpano-ominaisuuksia ja automaatioon vaikuttaviin ominaisuuksia. Tärkeimpänä ajatuksena tarkastelussa on tuoda esiin nykyisen kokoonpanon ongelmakohdat ja luoda saatujen tulosten perusteella kehitysehdotuksia.

Jokaiselle komponentille suoritetaan ensin ohjeistuksen mukainen tarpeellisuuden tarkastelu. Toiminnallisiin osiin vaikuttavia merkittäviä muutoksia ei ole tarkoitusta tehdä. Näiden toteuttaminen vie paljon aikaa ja vaatii syvää tietämystä sekä kokemusta tuotteesta. Tämän suorittaminen ei vastaa diplomityön työmäärää. Pyrkimyksenä on tältä osin tarkoitus arvioida nykyistä suunnittelua ja luoda niihin asennusta helpottavia kehitysehdotuksia.

Tarkastelu suoritetaan soveltaen työssä esiteltyä teoriaa kokoonpantavuuteen liittyen. Osien tarkastelu suoritetaan hyödyntäen kahta tapaa. Ensimmäisenä tapana on mennä tarkastelemaan kappaleita ja niiden kokoonpantavuutta fyysiselle kokoonpanopaikalle. Tämän tukena käytetään Autodesk Inventor professional 2019 ohjelmalla toteutettuja malleja. Inventorin mallien hyödyntäminen on oleellista, sillä osaa kappaleista on päivitetty, mutta niitä ei kokoonpanna sellaisenaan vielä tuotannossa. Tarkastelun suorittaminen aloitettiin rakentamalla Inventor malleista todellisuutta vastaava kokoonpano. Inventorissa koottu kokoonpano on esitettynä kuvassa 21.



Kuva 21 Poikkileikkaus kokoonpanosta 3D- sovelluksessa

Kokoonpantavuuden kysymykset jaetaan tässä työssä kolmeen osuuteen. Arvioitavat osuudet ovat seuraavat: osan tarpeellisuus, kokoonpano-ominaisuudet ja automaatioon vaikuttavat ominaisuudet. Ensimmäisenä suoritetaan osan tarpeellisuuden arviointi. Osan tarpeellisuuden arvioinnin tarkoituksena on selvittää komponentin olemassaolon syy tutkittavassa kokoonpanossa

1. Liikkuuko osa tuotteen käytön aikana merkittävästi muihin jo koottuihin komponentteihin nähden?

2. Onko osan välttämätöntä olla eri materiaalia tai erillään muista jo kootuista osista?
3. Onko osan välttämätöntä olla erillinen jo koottuihin osiin nähden, koska muuten tarvittavien osien purkaminen ja kokoonpano olisi mahdotonta toteuttaa?

Osan tarpeellisuuden jälkeen toteutetaan kokoonpano-ominaisuuksien arviointi. Kokoonpano-ominaisuuksien arviointiin käytetään taulukossa 3 esitettyjä kysymyksiä. Kokoonpanokysymyksien tavoitteena on löytää kehityskohteita, joita muokkaamalla kokoonpantavuutta saadaan helpotettua.

Taulukko 3 Kokoonpano ominaisuuksien tarkastelukysymykset

Onko valmistuksesta syntyvät purseet otettu huomioon? Onko niistä haittaa?
Onko työkaluille riittävä määrä tilaa?
Pysyykö osa ennen kiinnitystä paikallaan vai onko sitä tuettava vielä kiinnitysvaiheessa?
Aiheuttaako toleranssit, materiaali tai pintakäsittely erityisvaatimuksia kokoonpanolle?
Mitkä osaan liittyvät toiminnalliset asiat on huomioitava kokoonpanossa?
Onko asetuskohtaan esteetön pääsy?
Onko asetuskohta näkyvissä?
Tarvitaanko asetukseen ylimääräisiä liikkeitä?
Sovitusten määrä ja tarkkuus?

Viimeisenä vaiheena tarkastellaan automaatioon vaikuttavia ominaisuuksia. Automaation kannalta oleellisia kysymyksiä ovat seuraavat:

- Liittämistapa?
- Voiko osia pinota?
- Osan liittämissuunta?

- Tarvitaanko kaksi kättä?
- Onko osassa ja kappaleessa tarvittavat ohjaukset kokoonpanon helpottamiseksi?
- Vaatiiko osan kokoonpano voimaa?
- Onko liittämisliike suoraviivainen?

5.4 Kokoonpantavuustarkastelun suorittaminen

Tarkastelun ensimmäisenä osuutena on tutkia kohdeyksikön osalistaa. Tarkastelun kohteena on E12 yksiköiden suora malli. Kyseisen yksikön suoran mallin tarkasteluun päädyttiin siksi, että se kuvastaa hyvin Enduro- mallien tyypillistä kokoonpanoa. Valitun mallin osalista on esiteltynä taulukossa 4. Ennen kokoonpantavuuden tarkastelun suorittamista lasketaan nykyisen kokoonpanon suunnittelutehokkuus ja kiinnittämisen indeksi. Suunnittelun tehokkuus lasketaan Lucas DFA menetelmän mukaisella kaavalla. Ratkaisuun päädyttiin diplomityön lyhyen suoritusajan vuoksi. Mahdolliset kokoonpanoaikaan vaikuttavat muutokset eivät ole mitattavissa työn aikana. Laitteen toiminnan kannalta eivälttämättömiksi osiksi (Tyyppi B) arvioitiin seuraavat osat: ruuvit, tunnistekilpi, jousisokat, ahtoniitit, tulpat. Täten suunnittelun tehokkuuden ja kiinnittämisen indeksin arvoiksi saatiin seuraavat:

$$Suunnittelun\ tehokkuus = \frac{20}{20 + 37} \approx 35\ \%$$

$$Kiinnitämisen\ indeksi = \frac{23}{20} \approx 1{,}15$$

Taulukko 4 E12 suoran yksikön pelkistetty osalista

Osa	Määrä
Painelaippa	1
Laakeri A	1
Laakeri B	1
Tiiviste A	1
6-koloruuvi M8	9

6-koloruuvi M12	2
Lähtökansi	1
Yksikön runko	1
Tiiviste B	1
Tiivistekansi	1
Tunnistekilpi	1
Laakeri C	1
Laakeri D	1
Laakeri E	1
Lukitusmutteri (luisti)	1
Lukitusmutteri (ruuvi)	1
Tiiviste C	2
Tiiviste D	1
6-koloruuvi M8	6
Tulpparuuvi M8	4
Tulpparuuvi M10 A	1
Jousisokka 10x25	2
Ahtoniitti 2x5	2
Tulpparuuvi M10 B	1
6-kolotulppa ”R 1/8”	3
6-kolotulppa ”R1/4”	1
Sisärengas	1
6-koloruuvi M16	4
Tulpparuuvi M6	1
Tiiviste E	1
Ruuviroottori	1
Luistiroottori	1

5.4.1 Kappaleiden purseet

Kompressoriyksikön runko, painelaippa, lähtökansi, luistiroottori ja ruuviroottori koneistetaan itse Tampereella sijaitsevissa toimitiloissa. Valmistettavat kappaleet sisältävät vaativia toleransseja, jotka ovat tärkeitä kompressorin toiminnan kannalta. Kappaleiden on välttämätöntä tulla purseettomina tuotannosta kokoonpanoon. Koska käyttökohde ja vaatimukset ovat kaikille selvät, kokoonpanoon ei tule kuin satunnaisia purseellisia kappaleita. Tiivistekansi tulee alihankintana ja toimittaja on vastannut välttävästi laatuvaatimuksiin.

5.4.2 Runko

Runko on kokoonpanon ensimmäinen osa ja sen tarve olla kokoonpanossa on välttämätöntä. Rungon paino on 21 kg, joten sen siirtäminen ilman työvälineitä on raskasta. Rungossa on kuitenkin kierteitä nostosilmukan kiinnittämistä varten.

Kuvassa 12 on esiteltynä, miten runko on kiinnitettynä kokoonpanoon. Rungon ollessa kiinnitettynä telineeseen se tarjoaa erinomaisen perustan kokoonpanon myöhemmille vaiheille. Rungon asento mahdollistaa, että loppu kokoonpano saadaan koottua ylhäältä alaspäin yleisten DFA-ohjeistusten mukaisesti.

Ongelma on kuitenkin rungon kiinnitys kokoonpanopukkiin. Rungon kiinnittäminen työpukkiin tapahtuu hyödyntäen imuaukon ympärillä sijaitsevaa neljää kierrettä, jotka ovat esitettynä kuvan 22 vasemmanpuoleisessa yksikössä. Ensimmäinen ongelma on kiinnittäminen 4 kappaleella ylimääräisiä ruuveja, jotka eivät jää lopulliseen kokoonpanoon. Ruuvien asettaminen ja poistaminen kasvattavat täten tarvittavien työkalujen määrää, sekä kasvattavat kokoonpanoaikaa.

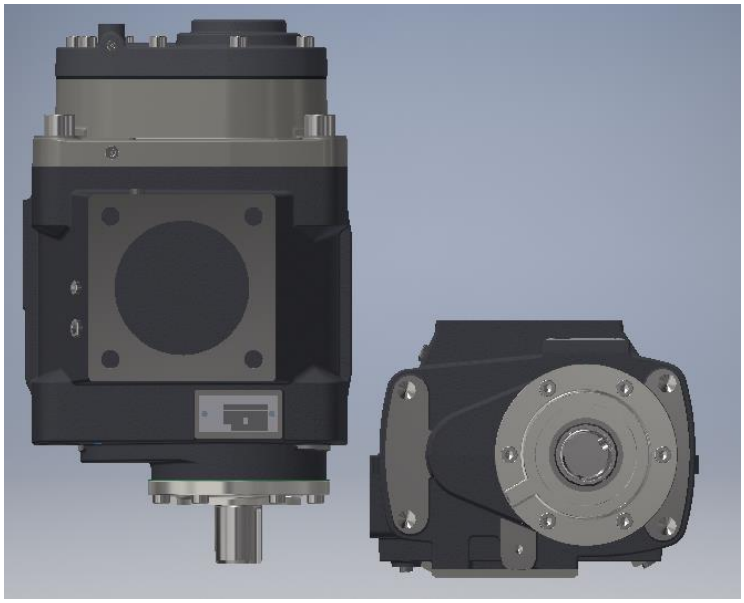
Toinen ongelma on rungon kohdistaminen niin, että vapaareiät sekä kierre saadaan saman keskeisiksi. Tällä hetkellä se tapahtuu täysin ilman asettamista tukevaa ohjausta. Runkoa kannatellaan nosturin varassa ja sen avulla voidaan säätää sen korkeussuuntaa. Sivuttaissuunnassa nosturissa ei ole kaukosäätimellä ohjattavaa säätöä, joten käyttäjä joutuu tekemään sivuttaissuunnan liikkeet manuaalisesti. Käyttäjä joutuu käyttämään molempia käsiään samanaikaisesti ja säätäminen paikalleen on haastavaa.

Edellä mainitun lisäksi kappale tulee kiinnittää niin, että työpukin kiinnityslevy on 180° käännettynä varsinaisesta kokoonpanoasetuksesta, jossa seuraavat työvaiheet tehdään. Tällä tavoin vältetään ruuvien ”sokea” asettaminen. Kiinnityksen jälkeen työpukki käännetään kokoonpanoasentoon. Rungon kiinnittämisen hankaluudesta ja hitaudesta

johtuen, osa käyttäjistä on kokenut helpommaksi nostaa painavat rungot käsin 90° käännetyn kiinnityslevyn päälle ja asettaa ruuvit alapuolelta, jolloin näkyvyys on jälleen kerran estynyt. Tämä tapa on nopein, mutta ergonomisesti vaativa rungon painon takia.

Kappaleessa on tarjolla koneistettuja pintoja ja keskittämistä mahdollistavia piirteitä, joita ei hyödynnetä kiinnittämisessä ollenkaan. Esimerkiksi imuaukkoa ja sekä rungon imupäässä, olevia koneistettuja pintoja (kuvassa 22 oikealla) voitaisiin käyttää runkokappaleen paikoitukseen. Tässä alikokoonpanossa koneistetut pinnat jäävät vapaaksi. Edellä esitetyn perusteella voidaan todeta, että rungon asettamisen prosessi on nyt varsin kompleksinen, eikä täten ole optimaalinen automatisoitavuuden kannalta.

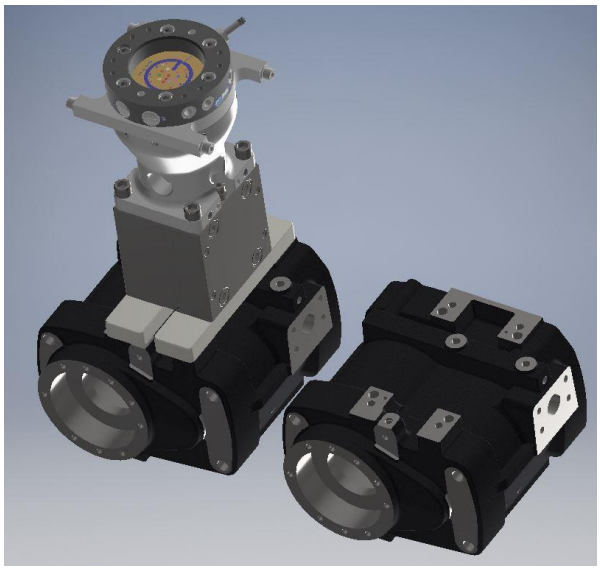
Kehitysehdotuksena tähän työvaiheeseen on pikakiinnityksen luominen. Pikakiinnitys voidaan toteuttaa esimerkiksi hydrauliikan avulla. Pikakiinnityksen käytöllä saataisiin vähennettyä kokoonpanossa käytettävien osien määrää. Yrityksen sisällä on kokemusta hydraulisten kiinnitysjärjestelmien toteuttamisesta. Tällä hetkellä FMS-linjalle on tulossa hydraulisia kiinnittimiä, joista erään toimintaperiaate soveltuisi myös kokoonpanon tarpeisiin.



Kuva 22 Imuaukko ja kompressorin imupää

Rungon käsittely on automatisoitavissa. Tällä hetkellä FMS-linjalle on koekäytössä ratkaisu, joka mahdollistaa runkokappaleiden käsittelyn robottiin kiinnitetyllä magneettisella- sekä kolmihaaratarttujalla. Ratkaisua on koekäytetty onnistuneesti rungon valukappaleella. Koekäytön antamien näyttöjen perusteella myös kappaleiden automaattista käsittelyä voidaan pitää vaihtoehtona. Kokoonpanossa käsittely vaatii kuitenkin nykyistä

paremmat ohjaukset, jotta kappaleen paikoittavuus on toistuvaa ja tarjoaa perustan automaation käytölle. Kappaleen käsittely ja tarttuminen on kuitenkin huomattavasti helpommin toteutettavissa. Valupintojen sijaan magneettista tarttujaa sovelletaan koneistetuille pinnoille. Koneistetut pinnat ovat tasaisia ja tarttuja pääsee tarrautumaan maalittomalle pinnalle.

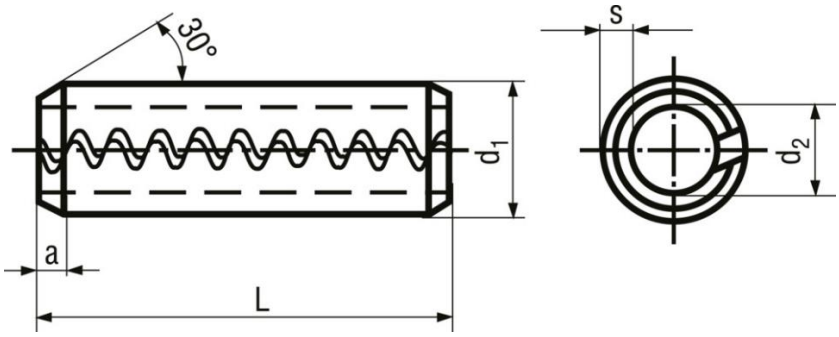


Kuva 23 Magneettitarttujan soveltaminen rungossa

5.4.3 Jousisokat

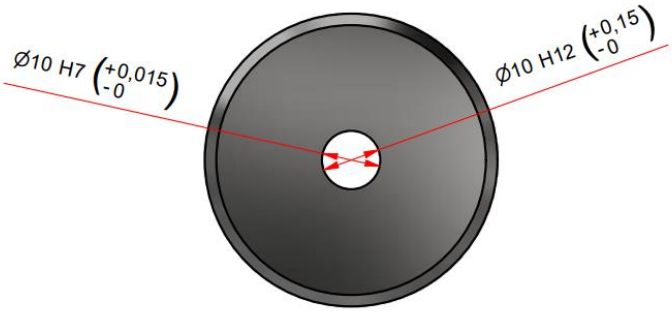
Kappaleiden kantamisen ja siirtelyn lisäksi nykyisen kokoonpanon ergonomisesti haastavimmaksi tilanteeksi jousisokkien asettaminen yksikön runkoon. Yksikön runkoon on tehty hyvän suunnittelun mukaiset viisteet asennuksen helpottamiseksi. Myös jousisokassa on reilu viiste. Sovite jousisokan ja rungon välillä on kuitenkin tiukka. Sokat vasaroidaan runkoon ja toimenpide vaatii paljon voimaa ja useita lyöntejä. Tämä on osoittautunut käyttäjien mielestä raskaaksi ja vaaralliseksi toimenpiteeksi. Lisäksi vasarointi koneistettujen pintojen päällä kasvattaa riskiä kappaleen vaurioitumiselle kokoonpanon aikana.

Tällä hetkellä kokoonpanossa käytetään kuvassa 24 esitettyjä BN 879 mallin raskaita jousisokkia hammastetulla uralla. Jousisokille tyypillisesti sen toiminta perustuu säteittäisen voiman kohdistamisen reiän seinämään asennuksen jälkeen. Jousisokka ei täten muuta isäntämateriaalin eli tässä tapauksessa poratun reiän geometriaa.



Kuva 24 Jousisokka BN 879

Jousisokan tarkoituksena on kohdistaa runko ja painelaippa. Tämä on oleellista, sillä painelaipassa on laakereita, jotka tulee kohdistaa roottoreiden kanssa laitteen pitkäikäisyyden varmistamiseksi. Tällä hetkellä asennus tapahtuu kuitenkin jousisokan valmistajan ilmoittamia toleransseja tiukemmalla sovitteella. Valmistaja on ilmoittanut BN 879 mallin asennusreiän sovitteeksi toleranssin H12. Painelaipan ja rungon piirustuksissa valmistustoleranssiksi on ilmoitettu kuitenkin H7. Eroa toleranssien välillä on esitetty kuvassa 25. Kun otetaan huomioon jousisokan toimintaperiaate sekä valmistajan ilmoittama toiminnallinen toleranssialue, voidaan nykyisten reikien toleranssien olevan liian tiukat. DFA ohjeistuksen mukaan helpossa kokoonpanossa toleranssien tulee olla niin väljät kuin mahdollista.



Kuva 25 Toleranssien H7 ja H12 ero 10 mm reiässä

Kuten kuvasta 25 voidaan huomata, toleranssi H7 kuuluu toleranssin H12 toleranssialueeseen. On siis mahdollista, että muutoksesta huolimatta kappaleiden reiät olisivat edelleen yhtä ahtaat kuin aiemmin. Täten valmistusvaiheessa osat tulisi koneistaa niin, että reikien toleranssi olisi lähempänä toleranssin ylärajaa kuin alarajaa. Muussa tapauksessa kokoonpanoon saapuu kappaleita, joiden sovitteissa on suuria eroja.

Urallisten jousisokkien käyttö on kuitenkin erään valmistajan mukaan yleisintä ei-kriittisissä kokoonpanoissa. Kriittisissä kohteissa on tapana käyttää joko kiinteitä DIN 6325

lieriösokkia tai DIN 7343 kierrettyjä jousisokkia. Erilaisten sokkien ominaisuuksia on vertailtu taulukossa 5.

Taulukko 5 Erilaisten sokkien ominaisuuksia. Mukailtu lähteestä (Greenwood 2020, s.3)

Yleiset piirteet ja edut			
	Kierretty jousisokka	Urallinen jousisokka	Kiinteä lieriösokka
Joustaa välttääkseen reiän vaurioitumisen	x	x	
Sallii laajan toleranssialueen	x	x	
Tarjoaa voimaa ja joustavuutta	x		
Sopii staattisiin sovelluksiin	x	x	x
Sopii dynaamisiin sovelluksiin	x		
Erinomainen kestävyys aksiaalista kuormitusta vastaan			x
Suoriutuu staattisesta rasituksesta pehmeissä materiaaleissa	x		x
Vaatii vähiten voimaa asennuksessa	x		
Soveltuu automaattiseen syöttöön	x	x	x
Huollettava	x	x	
Soveltuu kriittisiin kohteisiin	x		x

Taulukosta voidaan huomata kierrettyjen jousisokkien sisältävän useita kokoonpanolle tärkeitä ominaisuuksia. Asetukseen vaadittava voima on pienempi kuin urallisilla jousisokilla tai kiinteällä lieriösokalla. Kiinteän lieriösokan tavoin se sopii kriittisiin asennuksiin.

Toimintaperiaatteensa vuoksi se mahdollistaa asennukseen kiinteää mallia laajemman toleranssialueen. Samasta syystä laite on paremmin huollettavissa. Kierretty jousisokka ei vaurioita isäntämateriaaliin porattua reikää. Tämä on oleellista, sillä laitteita on tarkoitus huoltaa. Tästä syystä ehdotuksena on siirtyä kuvassa 26 esitettyjen kierrettyjen jousisokkien käyttöön.

Kuva 26 DIN 7343 kierretty jousisokka

Tarkastelussa oli myös tappimaisten ulokkeiden koneistaminen painelaippaan. Muutos vähentäisi kokoonpantavien osien määrää ja työkaluja. Tämä vaatii esimerkiksi muutoksia kappaleen kiinnitykseen koneistusvaiheessa. Suurimmaksi ongelmaksi muodostui kuitenkin kompressorin huollettavuus. Koneistetut uloketapit vastaavat kiinteitä lieriösokkia. Toimintaperiaatteen vuoksi reikä vaurioituu asennuksessa. Tästä syystä ehdotus ei ole optimaalinen.

5.4.4 Tulpat

Tarkasteltavassa tuotteessa esiintyvien tulppien käyttö on perusteltua. Muussa tapauksessa kokoonpanon toteuttaminen on mahdotonta. Tulppien avulla tukitaan runkoon, painelaippaan sekä lähtökanteen tehtyjä tarpeellisia porauksia. Osalistaa katsottaessa voidaan kuitenkin huomata, että useiden tulppien koot ovat hyvin lähellä toisiaan. Kokoonpano sisältää esimerkiksi tulppakoot M8, R 1/8 sekä M10. Mahdollisuuksien mukaan tulppakokoja tulisi yhtenäistää, jotta kokoonpanossa tarvittaisiin vähemmän työkaluja suoritettavaan työhön. Toinen huomioitava asia, joka vaikuttaa kokoonpanon helppouteen on tulppiin asetettava liima. Tulppien tiivistys on tarpeellista, jotta kompressori ei vuoda käytön aikana. Siitä huolimatta se on ylimääräinen työvaihe, sillä liiman levittäminen yksittäin jokaiseen tulppaan vie aikaa ja lisää tehtäviä suoritteita kokoonpanon aikana. Markkinoilla on useita valmistajia, joilta on saatavilla tiivisteellä tai tiivisteliimalla olevia tulppia.

5.4.5 Painelaippa

Painelaipan on välttämätöntä olla erillinen muihin osiin nähden. Muussa tapauksessa yksikön koonti ei onnistu. Kompressorin paineen tuottavien osien eli roottoreiden asennus on muussa tapauksessa mahdotonta. Painelaipan paino on 9 kg, joten se on käsiteltävissä myös useiden valmistajien yhteistyöroboteilla.

Painelaippa kiinnitetään paikalleen neljällä M16 koon ruuvilla. Ruuvien käyttö on perusteltua, sillä painelaippa sisältää yhteensä 4 kappaletta laakereita, jotka tulee olla helposti huollettavissa. Lisäksi kohteessa on usean pienen ruuvin sijaan käytetty ohjeistuksen mukaisesti vähäisempi määrä isoja ruuveja.

Painelaipan kokoonpanon suunnittelussa on ohjeistuksen mukaisia elementtejä. Työkaluille on hyvin tilaa, kokoonpanosuunta on ylhäältä alaspäin, osat pysyvät paikallaan ennen kiinnitystä ja tarvittavia liikkeitä on vähän. Tämän lisäksi laakerit paikoittuvat hyvin. Kokoonpanoprosessit ovat yksinkertaisia, mutta ne ovat kuluttavia ja vievät aikaa. Painelaipassa on sekä ruuvin, että luistin puolella 1 kappale laakereita, joiden sovite on tiukka. Tämä on kuitenkin välttämätöntä kompressorin toiminnan kannalta. Niiden asennuksessa tulisi kuitenkin siirtyä prässäykseen ajan ja käyttäjien säästämiseksi.

Painelaippa sisältää automaattisen käsittelyn kannalta edullisia piirteitä, eli tasaisia ja laakeita pintoja. Nämä mahdollistaisivat kappaleen käsittelyn esimerkiksi vastaavilla magneeteilla kuin rungossa.

5.4.6 Roottorit ja laakerikoolit

Roottorit ovat välttämätön osa laitteiston toimintaa. Täten niiden tulee olla omina osinaan. Muun asennuksen tapaan, myös roottoreiden asennus tapahtuu täysin manuaalisesti. Roottoreiden asennus tapahtuu ohjeistuksen mukaisesti ylhäältä alaspäin. Erityisesti ensimmäisenä asetettava ruuviroottori on malliesimerkki asennusliikkeistä. Toisena asennettavalle luistiroottorille haastetta lisää se, että sitä ei voida enää ruuviroottorin asennuksen jälkeen asettaa missä tahansa asennossa roottoripesään. Oikeassa asennossa kokoonpanoon tuotuna se kuitenkin ohjautuu omalla painollaan paikalleen. Molempien roottoreiden asennusta hankaloittaa viisteiden puute. Rungossa roottoripesän reunoilla ei ole viistettä, eikä sen soveltaminen ole myöskään mahdollista. Roottoreissa sen sijaan on erittäin pieni viiste, joka syntyy valmistuksesta aiheutuneiden purseiden poistosta. Viiste pyritään kuitenkin pitämään niin pienenä kuin mahdollista, sillä sen suuruus vaikuttaa suoraan kompressorin tuottoon. Roottoreiden ja roottoripesän välinen sovite on käsin liikuteltavissa ja sen laatu tasainen.

Ennen roottoreiden asentamista niihin tulee asettaa sisäkoolit. Sisäkoolien käyttö on perusteltua laitteen kunnossapidon ja huollettavuuden kannalta. Eli osan on välttämätöntä olla eri materiaalia. Sisäkoolien asettaminen tapahtuu tällä hetkellä kuitenkin lämmittämällä ja niiden asennus tapahtuu manuaalisesti. Lämmittäminen on aikaa vievä työvaihe. Lämmittämisprosessiin perustuva koolien asennus on myös haastava toimenpide automaatiolle. Koolien asettaminen on sovitteen vuoksi vaativaa jopa ihmisen aisteilla. Kooli on oltava orientoituna täysin oikein yhdellä yrittämällä, muussa tapauksessa se ehtii jäähtymään ja se supistuu asennuskelvottomaksi ja asennus vaatii työkaluja. Orientoinnin lisäksi asettaminen vaatii toisinaan samanaikaista kiertoliikettä. Koneellisen järjestelmän tuntuma tämänkaltaisiin toimintoihin on ihmistä heikompi. Lisäksi kiertoliike ja liu'uttaminen ovat kaksi haastavinta kokoonpanoliikettä robotille. Näiden yhdistäminen tarkkuutta vaativassa prosessissa ei ole järkevää.

Roottoreiden käsittely ja prässääminen on kuitenkin automatisoitavissa. Roottoreita käsitellään jo nyt automaattisesti tehtaan koneistamossa. Tarttujat ja menetelmät robotille ovat täten jo valmiina. Kooleissa ja roottorissa on asennusta helpottavia viisteitä sekä prässäykseen tarvittavat liikesuunnat ovat yksinkertaiset. Automatisoimista varten on täten suunniteltava prässäysjigi ja selvitettävä minkälaisia voimia koolien prässääminen vaatii. Laskenta perustuu teoksiin (NSK 2013; Ai 2013, s.2918). Kaavan 4 avulla voidaan laskea koolien prässäämiseen tarvittava voima Newtoneissa.

$$K = \mu \cdot p_m \cdot d \cdot B, \tag{4}$$

jossa μ on kitkakerroin, p_m on kosketuspintojen välinen paine, d on akselin nimellishalkaisija ja B on sisäkoolin leveys.

$$p_m = \frac{\Delta d}{d} \cdot \frac{1}{\left[\frac{m_S - 1}{m_S \cdot E_S} - \frac{m_i - 1}{m_i \cdot E_i}\right] + \frac{2}{E_i(1-k^2)}}, \tag{5}$$

jossa k on koolin paksuuden suhde, E_i on sisäkoolin kimmokerroin, E_s on akselin kimmokerroin, m_i on koolin poissonin luku, m_s akselin poissonin luku, Δd on todellinen ahdistus, k sisäkoolin sisähalkaisijan ja vierintäpinnan halkaisijan välinen suhdeluku.

Yritys valmistaa tarkasteltavan kompressorimallin roottoreita kahdesta eri materiaalista. Materiaaleilla on eri kimmokertoimet. Toisella materiaaleista kimmokerroin on noin 170 Gpa, toisella materiaalilla vastaava luku on 210 Gpa. Laakereiden koolit on valmistettu laakeriteräksestä 100Cr6. Laakeriteräksen kimmokerroin on myös 210 Gpa. Laitteiden mitoittamisen kannalta on oleellista tietää tarvittavat maksimivoimat koolien puristamiseen. Täten laskennassa käytetään suuremman kimmokertoimen omaavaa materiaalia. Koska koolin ja akselin materiaalien kimmokertoimen arvo on sama, niin kaava 5 voidaan esittää kaavan 6 mukaisessa muodossa. Koska akseli ei ole ontto, saa k_0 arvon 0.

$$p_m = \frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta d}{d} \cdot \frac{(1-k^2)\cdot(1-k_0^2)}{1-k^2\cdot k_0^2}, \tag{6}$$

jossa E on materiaalien kimmokerroin, k_0 on onton akselin paksuuden suhde.

Akselin pinnankarheudella on selvä vaikutus kiinnittämisessä tarvittavaan voimaan. Teoksen (NSK, 2013) mukaan pinnankarheudella on millin tuhannesosien vaikutus koolin ja akselin väliseen sovitteeseen. Mitä hienompi pinta akselissa on, sitä tiukempi sovite on todellisuudessa. Tästä syystä koolien kiinnittämiseen tarvittavan voiman laskennassa on selvitettävä todellinen ahdistus Δd kappaleiden välillä. Tämän ratkaisemiseksi on laskettava ensin ilmeinen ahdistus koolin ja akselin välillä. Laskenta suoritetaan kappaleista ilmoitettujen toleranssien mahdollistaman suurimman ahdistuksen mukaan. Suurin mahdollinen ahdistus saadaan laskettua kaavalla 7:

$$\Delta d_a = s_{max} - i_{min}, \tag{7}$$

jossa Δd_a on ilmeinen ahdistus, s_{max} on akselin ulkohalkaisijan toleranssin yläraja, i_{min} on koolin sisähalkaisijan toleranssin alaraja.

Roottoreiden akselit ovat pyöröhiottuja, joten todellisen ahdistuksen ratkaiseminen voidaan suorittaa kaavan 8 avulla:

$$\Delta d = \frac{d}{d+2} \Delta d_a, \tag{8}$$

Sisäkoolin sisähalkaisijan ja vierintäpinnan halkaisijan välinen suhdeluku k voidaan ratkaista seuraavan kaavan 9 avulla:

$$k = \frac{d}{D_i}, \tag{9}$$

jossa D_i on sisärenkaan vierintäpinnan halkaisija.

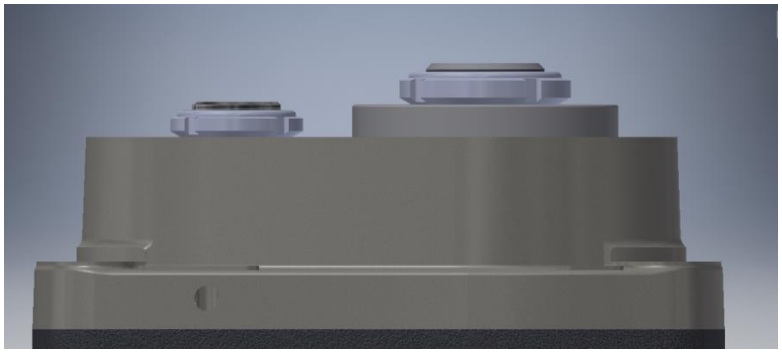
5.4.7 Akselimutterit

Akselimuttereiden käyttö kokoonpanossa on välttämätöntä. Akselimutterit vaikuttavat suoraan kompressorin toiminnallisuuteen. Akselimuttereiden käytöllä lukitaan roottorit, laakerit ja runko toisiinsa. Tämän lisäksi akselimuttereiden avulla säädetään mainitun kokonaisuuden välyksiä. Välyksien säätö pakollista, sillä muussa tapauksessa kompressori leikkaa kiinni. Välyksien oikean säätöalueen toleranssi asettaa kokoonpanoon erityisvaatimuksia. Välyksien toleranssialue on millin kymmenesosien luokassa. Välyksien manuaalinen säätö on täten hyvin haastavaa jopa ihmisen aisteilla. Tästä syystä akselimuttereiden asennus on keskimäärin kokoonpanon eniten aikaa vievä työvaihe.

Välyksien säädössä on kokeiltu erilaisia akselimuttereita säädön helpottamiseksi. Akselimutterit on vaihdettu kitkarenkaallisiin malleihin, joka on esitettynä kuvassa 27. Kitkarenkaallisen mallin avulla kokoonpanosta on saatu poistettua yksi ylimääräinen työvaihe, koska akselimutterissa ei ole enää lukitusruuvia. Se pysyy paikallaan pelkän kitkarenkaan avulla.

Kuva 27 Kitkarenkaallinen akselimutteri

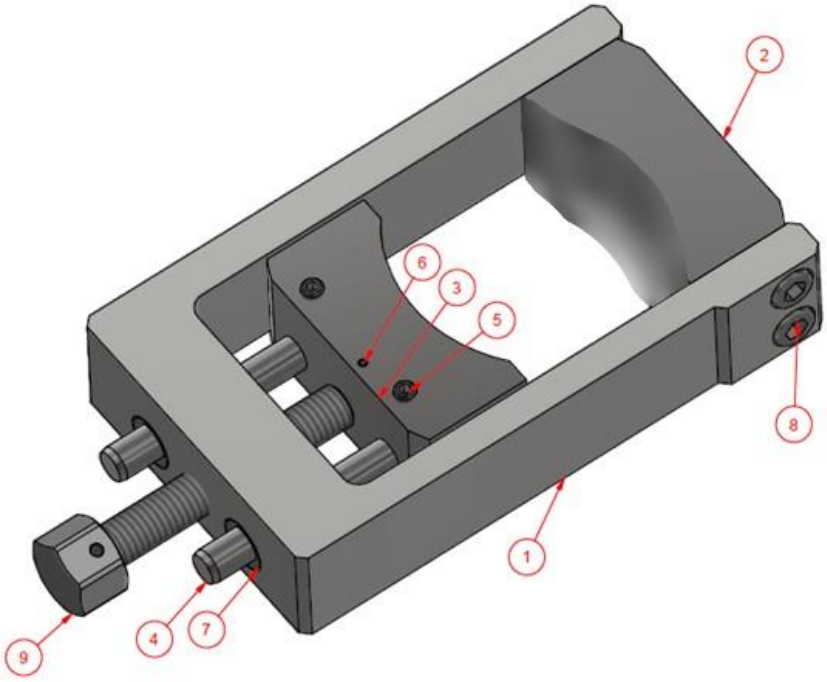
Yhden työvaiheen poistuminen ei kuitenkaan ole tuottanut toivottua tulosta kokoonpanoaikoihin. Lisäksi uusi uuden akselimutterin viisto alapinta on osoittautunut haastavaksi sekä käytön, että työturvallisuuden kannalta. Välyksien mittaus tapahtuu seuraavalla tavalla: roottorin, akselimutterin sekä laakereiden muodostamaa kokonaisuutta pyritään nostamaan ylöspäin akselimutteria hyödyntäen. Nostamiseen käytettävän työkalun soveltaminen on koettu kuitenkin haastavaksi. Tämän lisäksi sen käytön on koettu vaarantavan työturvallisuutta. Tämän lisäksi tulokset eivät ole täysin tasalaatuisia, sillä nosto tapahtuu vain yhdeltä puolelta. Kuvassa 28 on havainnollistettu näkymää sivusta välyksensäätövaiheessa.



Kuva 28 Tilanne välyksensäätövaiheessa

Diplomityöhön liittyen välyksensäädön mittausvaiheeseen on mallinnettu prototyyppityökalu. Sen avulla on tarkoituksena selvittää, onko akselimutterin alle mahdollista liu'uttaa luiskamaiset työntöpalat, jotka nostaisivat roottoreita. Työkalu on suunniteltu niin, että sitä voidaan soveltaa luistin sekä ruuvin puolen välyksen mittauksessa. Menetelmän

etuna on jo tässä vaiheessa sen käyttäjien fysiologisen kuorman keventäminen sekä työturvallisuuden parantaminen. Tämän lisäksi sen avulla saadaan kartoitettua arvokasta tietoa mahdollisista menetelmistä tulevaisuuden mahdollista automaatiota varten. Prototyyppi tulee tarvitsemaan käsittelyyn vielä kaksi kättä. Laite tarvitsee kiristysvaiheessa tuentaa, kunnes liukupinnat alkavat ottaa kiinni toisiinsa. Prototyyppi on esiteltynä kuvassa 29.



9	1	Säätöruuvi	
8	4	DIN 912 - M6 x 16	Cylinder Head Cap Screw
7	2	08900-A0800X20	08900-Drill bushes cylindrical, DIN 179, Form A
6	1	03315-020X28 Steel	03315-Split pins heavy version ISO 8752
5	2	DIN 913 - M5 x 16	Hexagon Socket Set Screw
4	2	ISO 8734 - 8 x 60	Parallel pins of hardened and martensitic stainless steel and (Dowel pins
3	1	Työntöpala_L	
2	1	Työntöpala_S	
1	1	Säätötyökalun U-pala	
Item	Qty	Part number	DESCRIPTION

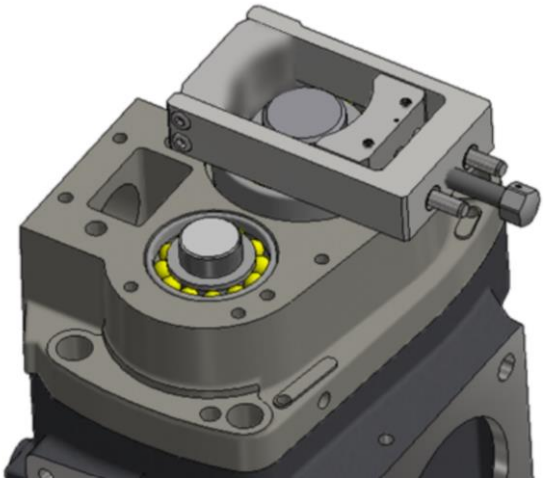
Kuva 29 Välyksenmittauksen prototyyppityökalu

Suunnitellun työkalun toiminnaltaan oleellisimmat osat ovat työntöpalat. Työntöpalat valmistetaan ensimmäisessä vaiheessa S355 teräksestä. Tämän avulla testataan menetelmän toimivuutta. Jos menetelmä todetaan toimivaksi, seuraavat käyttöön tulevat palat karkaistaan tai ne valmistetaan materiaalista 42CrMo4 ja nitrataan eli typetetään. Valinta riippuu kokeilun tuloksista. Tämä on tarpeellista koska palat ovat jatkuvassa käytössä ja

työntöpalan luiskamaisen osuuden alimmassa kohdassa materiaalin paksuus on vain 1,75 millimetriä.

Työntöpaloista toinen on lukittuna 4 kappaleella M6 ruuvilla U-palan päähän. Toinen työntöpala on liikuteltava ja sen liikuttaminen tapahtuu DIN 6332 työntökärjellisen vaarnaruuvin avulla. Liikkuvan työntöpalan horisontaalisen asemoinnin varmistamiseksi kokoonpanossa on sokkatapit, jotka liukuvat poraholkkeja vasten.

Työkalun käyttöä on havainnollistettu kuvassa 30. Käyttäminen tapahtuu säätämällä työntöpalat etäisyydelle, jossa akselimutteri mahtuu työntöpalojen väliin. Tämän jälkeen työkalu asetetaan kuvan 30 mukaisesti ja roottorin päähän asetetaan mittakello ja se asetetaan nollaan. Tämän jälkeen työkalun säätöruuvia kiristetään, kunnes mittakellon lukema ei enää muutu.



Kuva 30 Mittatyökalu välyksensäätövaiheessa

5.4.8 Tiivistekansi ja akselitiiviste

Tiivistekannen, akselitiivisteen ja tulpan alikokoonpano on viimeinen yksikköön kiinnitettävä komponentti. Tällä hetkellä tiivisteen puristaminen tiivistekanteen tapahtuu kaukana muusta kokoonpanosta ja lisää täten turhaan kokoonpanoaikaa. Tämän lisäksi kokoonpano suoritetaan laitteella, jota ei ole tarkoitettu niin ahtaiden sovitteiden puristamiseen. Työvälineen väännintä on jouduttu jatkamaan suuremman voiman saamiseksi.

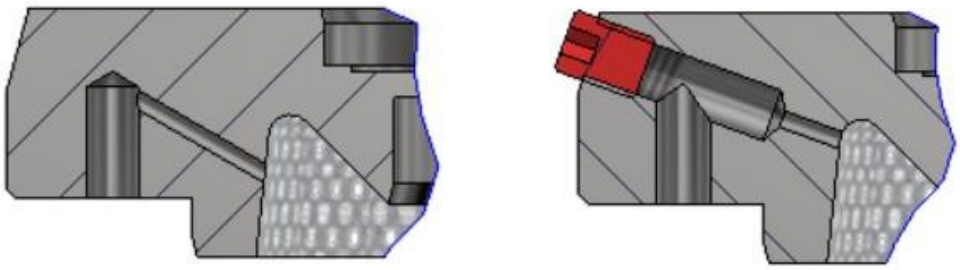
Edellä todettu ahdas sovite ei ole ideaalinen kokoonpantavuuden kannalta, sillä kokoonpanossa tarvitaan voimaa. Sovite on kuitenkin perusteltu, sillä väljempi sovite mahdollistaisi tiivisteen pyörimisen akselin mukana. Toisenlaiseen kiinnitystapaan perustuva ratkaisu sen sijaan lisäisi työvaiheessa tarvittavien työkalujen määrää. Yrityksessä tiivistenkantta varten on tiivisteenasennukseen suunniteltu jigi, joka paikoittaa tiivistekannen

omalla painollaan puristimen alle. Tiivistekannessa on viiste, jonka avulla akselitiiviste kohdistuu prässäyksessä paikalleen.

Seuraavassa vaiheessa tiivistekansi kiinnitetään runkoon. Tiivistekannessa on uloke, jonka viiste ohjaa sen ohjeistuksen mukaisesti runkoon. Akselitiiviste sen sijaan asettaa tässä vaiheessa erityisvaatimuksia kokoonpanoon. Roottorin päähän asetetaan väliaikaisesti sileäksi hiottu kartiomainen holkki varmistamaan, että akselitiiviste ei vaurioidu asennuksen aikana. Tiivistekannen kiertoliikettä akselin ympäri ei ole lukittu mitenkään.

Tiivistekannen liittämistapana käytetään 6 kappaletta koon M8 ruuveja. Syynä tähän on helppo huollettavuus ja luotettava liitos. Tiivistekannen alla on laakeri, joka kuuluu laitteen tyypillisiin varaosiin. Tiivistekannen asettaminen paikalleen tapahtuu ylhäältä-alas etenevällä liikkeellä. Kokoonpano on toteutettavissa yhdellä kädellä.

Tällä hetkellä tiivistekannen alikokoonpano sisältää ylimääräisen työvaiheen. Ennen akselitiivisteen puristamista kanteen tulee kiinnittää tulppa. Tulppa on kuitenkin tarpeeton, tätä on havainnollistettu kuvassa 31. Kuvan vasemmalla puolella on esitetty uusi ehdotus ja kuvan oikealla puolella nykytilanne. Kun laippa on kiinnitettynä runkoon, se yhdistyy kuvassa esitetyn pystysuuntaisen porauksen avulla kompressorin voiteluun. Nykytilanteessa voitelu imupään laakerille varmistetaan toteuttamalla poraus tiivistekannen ulkopinnalta sisäpuolelle asti. Vaihtoehto on valmistusteknisesti helpompi, mutta se vaatii ulkopuolelle tulppauksen. Ehdotetussa ratkaisussa poraus suoritettaisiinkin sisäpuolelta, jolloin poraus voitaisiin porata vain kanavaan asti ja tulppausta ei tarvita. Tulpan asettaminen ihmiselle on pieni vaiva, mutta automatisoidussa kokoonpanossa tällä on suuri merkitys yksinkertaisuuden ja työkalunvaihtojen kannalta.



Kuva 31 Tiivistekannen öljykanavan kehitysehdotus ja nykytilanne

5.4.9 Tiivisteet

Kokoonpanossa tiivistysratkaisuina sovelletaan kahta erilaista tiivistysmenetelmää. Tiivisteitä sovelletaan kriittisten kappaleiden välisissä liitoksissa. Tiivistysmenetelmien tarkoituksena on estää öljyä valumasta ulos ruuviyksiköstä, sekä suojata laitteistoa ulkopuoliselta pölyltä ja muulta lialta. Tämän hetken suurin ongelma on liitosten yhtenäisyyden puute. Tämän lisäksi ratkaisut ovat haastavia automaation puolesta. Molemmat tiivisteratkaisut ovat rakenteeltaan joustavia. Joustavien kappaleiden käsittely automatisoidusti on haastavaa. Tiivisteet tulisi täten yhtenäistää sellaisiksi, että kaikkien asennus tapahtuu samalla tavalla. Kehitysehdotuksena on siirtyminen pelkän liiman käyttöön. Pelkän liiman käyttö on mahdollista kompressoreissa. Esimerkiksi eräässä kohdeyrityksessä valmistettavassa suuressa kompressoriyksikössä tiivistysratkaisuna käytetään ainoastaan liimaa.

5.4.10 Tunnistekilpi ja ahtoniitit

Tunnistekilven kiinnitys tapahtuu tällä hetkellä kahden ahtoniitin avulla. Kokoonpanossa on hyvin tilaa työkaluille. Tunnistekilvessä ei ole ohjauksia, jotka auttaisivat sitä kohdistumaan paikalleen kokoonpanoon. Tunnistekilpi on myös mahdollista asentaa väärin kokoonpanoon. Liittäminen tapahtuu vasaroimalla ja siihen tarvitaan kaksi kättä, koska ahtoniitit eivät pysy itsestään paikoillaan. DFA-suunnitteluohjeistuksen perusteella tunnistekilven käytölle ei ole mitään perusteita. Tästä syystä tämä työvaihe tulisi poistaa kokoonpanosta, jotta kokoonpantavien osien määrä vähenisi ja ylimääräisestä vasaroinnista päästäisiin eroon. Kilven sijaan rungot voitaisiin merkitä esimerkiksi laserilla tai kaivertamalla.

Vasaroinnin poistumisen lisäksi laserilla merkkaaminen mahdollistaisi osien kätevämmän jäljitettävyyden myös huoltovaiheessa. Tällä hetkellä kilpi sisältää tunnisteen, joka on luettava manuaalisesti. Laserin avulla voidaan kappaleen pintaan kaivertaa esimerkiksi QR- koodi. Luettaessa QR-koodia lukijalla se paljastaa käyttäjälle välittömästi laitteen valmistuspäivän, erän ja muut olennaiset siihen tallennetut tiedot.

QR-koodi on kehitetty tähän tarkoitukseen vuonna 1994 Toyota konserniin kuuluvan Denson toimesta. QR-koodin alkuperäisenä tarkoituksena oli toimia autoteollisuudessa tuotannonhallinnan työkaluna. Sieltä se on levinnyt myös muille aloille (Soon 2008, s.60).

5.4.11 Laakerit

Yksikkö sisältää yhteensä 6 kappaletta laakereita. Laakereiden olemassaolo on välttämätöntä laitteen toiminnan kannalta. Neljä laakereista sijaitsee yksikön painelaipassa.

Laipassa on sekä ruuvin, että luistin puolella 1 kappale laakereita, jotka voidaan asentaa optimaalisella tavalla paikalleen. Ne asetetaan ylhäältä alas yhdellä suoralla liikkeellä ja hakevat paikkansa omalla painollaan. Molemmilla puolilla on myös toiset haastavammalla tavalla asennettavat laakerit. Myös niiden asennus tapahtuu suoralla liikkeellä, mutta sovite on laitteen toiminnallisten syiden takia tiukka. Vastaavalla tavalla asetetaan imupään ruuvin puolen laakeri. Laakerit kuitenkin ohjautuvat painelaipan viisteiden ja laakerin pohjan pyöristyksen ansiosta hyvin paikalleen. Roottoripesän pohjaan asennettavan imupään laakerin asennus on myös prosessina yksinkertainen. Rungon yläpinnasta laakeripesän yläpintaan on kuitenkin 190 mm matkaa, tämä asettaa työkalun suunnitteluun vaatimuksia.

Koolien tavoin, myös laakereiden asennuksessa tulisi siirtyä kappaleiden prässäämiseen. Laakereiden prässäämiseen tarvittava voima voidaan ratkaista kaavan sisäkoolien tavoin kaavan 4 avulla. Laakerin ja laakeripesän toleranssit mahdollistavat jopa välyksellisen tilanteen. Maksimivoiman ratkaisemiseksi tilanne ratkaistaan tiukimman sallitun sovitteen perusteella. Prässäämiseen tarvittavan voiman laskeminen aloitetaan laskemalla laakerin ja laakeripesän kosketuspintojen välinen paine. Tässä tapauksessa kosketuspintojen välisen paineen laskemiseen sovelletaan eri kaavaa. Tämä on esitetty kaavassa 10. Laskenta perustuu teoksiin (Ai 2013, s.2918; NSK 2013)

$$p_m = \frac{\Delta D}{D} \cdot \frac{2}{\left[\frac{m_e - 1}{m_e \cdot E_e} - \frac{m_h - 1}{m_h \cdot E_h}\right] + 2\left[\frac{h^2}{E_e(1-h^2)} + \frac{1}{E_h(1-h_0^2)}\right]}, \tag{10}$$

Jossa D on laakeripesän sisähalkaisija, ΔD on todellinen ahdistus, E_e on ulkokoolin kimmokerroin, E_h on laakeripesän kimmokerroin, m_e on ulkokoolin materiaalin poissonin luku, m_h on laakeripesän poissonin luku, h ulkokoolin vierintäpinnan ja ulkohalkaisijan välinen suhdeluku. Kaavan h_0 on laakeripesän sisähalkaisijan ja ulkohalkaisijan suhdeluku. Koska laakeripesä ulkohalkaisija ei ole muodon vuoksi määritettävissä, käytetään tällöin ratkaisuun ulkohalkaisijan ehdotettua arvoa ∞, jolloin h_0 saa arvon 0.

Laskenta suoritetaan vastaavalla tavalla kuin sisäkooleissa. Kosketuspintojen välisen paineen ratkaisemiseksi tulee ensin ratkaista todellinen ahdistus ΔD. Todellisen ahdistuksen kaava eroaa aiemmasta, sillä pesien pinta ei ole yhtä hieno. Todellisen ahdistuksen ratkaisemiseksi tulee ratkaista ensin ilmeinen ahdistus ΔD_a. Ilmeisen ahdistuksen laskenta on esitetty kaavassa 11.

$$\Delta D_a = e_{max} - h_{min}, \tag{11}$$

jossa e_{max} on ulkokoolin ulkohalkaisijan toleranssin yläraja ja h_{min} on laakeripesän sisähalkaisijan toleranssin alaraja.

Todellinen ahdistus koneistetussa pesässä saadaan ratkaistua kaavasta 12.

$$\Delta D = \frac{D}{D+3} \cdot \Delta D_a, \tag{12}$$

Ulkokoolin vierintäpinnan halkaisijan ja ulkohalkaisijan välinen suhdeluku saadaan ratkaistua kaavasta 13.

$$h = \frac{D_e}{D}, \tag{13}$$

jossa D_e on ulkokoolin vierintäpinnan halkaisija.

6. TULOKSET

6.1 Kyselytutkimuksen tulokset

Tämän luvun alussa esitellään Enduro 12 yksiköiden kokoonpanoon tehdyn työergonomiaan ja työolosuhteisiin liittyvän kyselyn tuloksia. Kyselyn tarkoituksena oli selvittää, mitkä prosessit kokoonpanossa ovat sellaisia, että käyttäjät kokevat teemaan liittyen haastaviksi. Kyselyyn osallistui 19 kokoonpanolinjalla työskentelevää tai lähiaikoina työskentelevää henkilöä.

Kyselyssä selvinneiden tulosten perusteella käyttäjät ovat kokonaisuudessaan varsin tyytyväisiä nykyiseen kokoonpanoprosessiin yleisesti. Noin 73,5 % vastaajista oli antanut pisteytyksessä arvosanan 7–10. Kyselyn arviointiasteikko oli 1–10, jossa arvosana 1 kuvasi ”käyttäjä ei ole lainkaan tyytyväinen kokoonpanoon” ja arvosana 10 ”käyttäjä on täysin tyytyväinen kokoonpanoon. Seuraavassa vaiheessa kyselyssä tiedusteltiin kuinka haastavaksi ergonomian kannalta käyttäjät kokevat nykyisen prosessin. Arvosteluasteikko oli jälleen 1–10. Vastausvaihtoehto 1 tarkoitti, että kokoonpano ei ole lainkaan kuormittavaa ja vastausvaihtoehto 10 vastaavasti tarkoitti kokoonpanon olevan liian kuormittava. Jopa 57 % vastaajista antoi arvosanaksi 7 tai 8.

Kokoonpanon loput kysymykset pyrkivät kartoittamaan, että mitkä kokoonpanon prosessit vaatisivat eniten kehitystyötä. Vastauksissa oli hieman hajontaa, mutta kokonaisuudessaan haastavimmaksi operaatioksi osoittautui sokkien vasaroiminen yksikön runkoon. Jopa 63 % vastaajista oli sitä mieltä, että tämä prosessi vaatii työn kuormittavuuden näkökulmasta kehitystyötä. Sama osuus vastaajista ilmoitti, että heille on aiheutunut tästä vaiheesta rasituksesta aiheutunutta kipua. Noin 47 % vastaajista ilmoitti, että työvaihetta tulisi kehittää myös turvallisuuden näkökulman vuoksi ja 31,5 % vastaajista oli sitä mieltä, että toimenpide tulisi automatisoida. Sokkien vasaroinnin lisäksi myös muut vasarointia vaativat toimenpiteet saivat paljon ääniä työn kuormittavuudesta. Lyöntioperaatioiden lisäksi kokoonpanossa suoritettava välyksen säätö ja mittaus sai merkittävän määrän ääniä. Syynä tähän oli työn turvallisuus. Jopa noin 37 % prosenttia ilmoitti kokeneensa vaaratilanteen välyksen säätö ja mittaus vaiheessa.

6.2 Kokoonpantavuuden tarkastelun tulokset

Ruuviyksikön kokoonpantavuuden tarkastelussa ilmeni, että ruuviyksikkö noudattaa varsin hyvin kokoonpantavuuden suunnitteluohjeistuksia. Ennen tarkastelua suunnittelun tehokkuudeksi saatiin noin 35 %. Suunnittelun tarkastelussa verrattiin toiminnan kannalta välttämättömien ja ei-välttämättömien komponenttien suhdetta. Usein uudelleensuunnittelussa tähdätään tulokseen 45 %. Tuotteelle laskettiin myös kiinnittämisen indeksi, jossa verrataan välttämättömien osien määrää kiinnitysvälineiden kuten ruuvien määrään. Tässä tarkastelussa suhteeksi saatiin 1,15. Tarkastelun ihannelukema on 1, uudelleensuunnittelua tulisi harkita, jos lukema ylittää arvon 1,5. Varsinkin tällä osa-alueella kokoonpanon suunnittelu on hyvää. Yksikön onnistuneen suunnittelun vuoksi sen komponenttien määrään ei saatu merkittäviä muutoksia. Merkittävimpänä muutosehdotuksena komponenttien määrän vähentämiseksi on tiivistekannen öljykanavan porauksen muutos. Sen avulla saavutetaan tulpan poistaminen kokoonpanosta. Toisena suorana muutosehdotuksena osien määrän kannalta on tunnistekilvestä ja sen asennukseen tarvittavista ahtoniiteistä luopuminen. Suunnitteluohjeistuksen mukaan kilven olemassaololle ei ole mitään perusteita kokoonpanossa. Tunnistekilven sijaan yksikköön voidaan merkitä esimerkiksi laserin avulla QR-koodi, jonka avulla tuotteen asennus ja yksilöinti olisi nykyistä helpompaa.

Komponenttien määrän vähentämisen lisäksi tarkasteltiin kokoonpantavien osien rakennetta ja kokoonpanomenetelmiä. Tarkastelussa ilmeni seuraavia asioita, ne ovat esiteltynä tarkemmin luvussa 5.3:

- Jousisokat asennetaan liian tiukalla sovitteella
- Urallisten jousisokkien sijaan kokoonpanossa voitaisiin soveltaa DIN 7343 kierrettyjä jousisokkia pienemmän asennusvoiman ja paremman soveltuvuuden vuoksi.
- Rungon asettaminen paikalleen on hidas ja suunnittelultaan puutteellinen prosessi. Se sisältää ylimääräisiä kiinnityksiä. Ne eivät tule ilmi tarkastellusta osalistasta, sillä osalista sisältää vain kokoonpanoon jäävät osat. Niiden kiinnittäminen ja avaus aiheuttavat kuitenkin kaksi ylimääräistä ruuvausprosessia ja lisäävät täten kokoonpanon ”osien määrää” 8 kappaleella. Kiinnitys tulisi suorittaa pikalukituksella.
- Välyksenmittaus on haastavaa ja vaarallista. Sen helpottamiseksi suunniteltiin prototyyppityökalu.

- Laakereiden koolit voitaisiin lämmittämisen sijaan asentaa prässin avulla roottoreille.
- Painelaipan laakereiden asennus voitaisiin myös suorittaa prässäämällä
- Tiivistämisessä ratkaisuja tulee yhtenäistää.
- Tulppien asennuksessa tulisi siirtyä valmiiksi tiivistettyihin tulppiin. Liiman asettaminen 11 tulppaan on ylimääräistä työtä.

6.3 Sisäkoolien prässäykseen vaadittava voima

Työssä ratkaistiin sisäkoolien prässäykseen vaadittava voimat. Voimien ratkaiseminen on oleellista, jotta tulevaisuudessa ei päädytä yli- tai alimitoitettuihin työkaluihin. Todellisuudessa on kuitenkin varauduttava tuloksia voimakkaammilla työkaluilla. Koolin ja akselin kohdistuksen ollessa pielessä tai koolin soikeuden vuoksi vaadittava voima voi kasvaa laskettuja tuloksia suuremmiksi. Alla olevassa taulukossa 6 on esiteltynä saadut tulokset.

Taulukko 6 Sisäkoolien prässäykseen vaadittavat voimat

	Luistin imupää	**Luistin painepää**	**Ruuvin imupää**	**Ruuvin painepää**
Voima (kN)	5,13	5,61	12,4	8,85

6.4 Laakereiden prässäykseen vaadittava voima

Työssä ratkaistiin myös laakereiden prässäykseen vaadittavat voimat. Perusteina laskennalle vastaavat kuin sisäkoolien laskennassa. Tavoitteena on edesauttaa lyöntityökalujen käytön vähentämistä yksiköiden kokoonpanotyössä. Saadut tulokset ovat esiteltynä taulukossa 7.

Taulukko 7 Laakereiden prässäykseen vaadittavat voimat

	Painelaippa, ruuvin puoli	**Painelaippa, luistin puoli**	**Ruuvin imu-pään laakeri**	**Luistin imupään laakeri**
Voima (kN)	3,10	2,15	2,90	1,93

7. PÄÄTELMÄT

Kehitysehdotuksien luominen itse tuotteeseen osoittautui vaativaksi prosessiksi. Tuotteen toiminnallisuuteen vaadittavat tarkat toleranssit, huollettavuus ja työn aikataulu asettivat haastavat vaatimukset kokoonpantavuuden kehitystyölle. Kokoonpanon osien määrä on vuosien aikana muovautunut varsin optimoiduksi. Ennen kokoonpantavuuden tarkastelun suorittamista tuotteelle laskettiin suunnittelun tehokkuuden arvo. Suunnittelun tehokkuuden arvoksi saatu 35 % on armoton arvio tuotteelle. Yksikkö sisältää yhteensä vain 57 komponenttia. Näistä painelaipan, tiivistekannen ja lähtökannen tiiviiden liitoksien varmistamiseksi tarvitaan 21 ruuvia, nämä ovat ainoat kokoonpanossa esiintyvät ruuvit. Koska laitteessa ollaan tekemisissä paineen kanssa, niin sen liitokset tulee mitoittaa vaadittavien painetestauksien mukaisesti. Tämä johtaa varmuuskertoimien avulla määritettyyn pulttien määrään. Tämän lisäksi laitteessa on 11 tulppaa. Tulppien määrä on kuitenkin yhtä lukuun ottamatta perusteltua modulaarisuuden vuoksi. Laitetta sovelletaan erilaisissa käyttökohteissa ja täten siinä on oltava liitäntävalmiuksia erilaisiin tilanteisiin. Ruuvien ja tulppien summan ollessa 32 komponenttia, se huonontaa suunnittelun tehokkuutta merkittävästi.

DFA kokoonpantavuuden ohjeistus ei välttämättä ole optimaalisin valinta tämänkaltaisten tuotteiden parantamisessa. Se tarjoaa erinomaisen suunnittelun perusohjeistuksen. Tämä ei kuitenkaan tuo merkittävää lisäarvoa tuotteessa, joka koostuu pääosin tarkoista toleransseista ja koneistetuista kappaleista. Tämänkaltaisissa tuotteissa toiminnalliset osat ohjaavat tuotteen muotoilua. Tästä syystä ohjaukset, viisteet, pyöristykset asetussuunnat ym. ovat väkisinkin kunnossa. Muuten tuotteen kokoonpano ja toiminta on vaativaa tai mahdotonta. Esimerkiksi sovitteiden väljentäminen on erittäin vaativaa. Osat valmistetaan pitkälti standardien ja valmistajien ilmoittamien tietojen perusteella.

Tarkasteltavan tuotteen suurimmat kehityskohteet eivät sijaitse itse tuotteessa. Kokoonpanomenetelmät sen sijaan eivät sen sijaan ole nykypäiväiset. Yksikön kokoonpantavuudesta ei oteta sen potentiaalia irti kokoonpanossa. Tuotteet valmistuvat varsin nopeasti, mutta osa toimenpiteistä tulisi toteuttaa paremmin soveltuvin työkaluin. Lisäksi asennuksessa tulisi hyödyntää enemmän automaatioita. Tuotteet ovat hyvin vakioituja ja niitä rakennetaan päivittäin. Yksiköiden kokoonpano sisältää esimerkiksi paljon vasarointia vaativia toimenpiteitä. Vastaavia esiintyy myös muissa malleissa. Täten olisi jär-

kevää luoda prässäyspiste, jossa painelaippojen laakereiden, sokkien ja akselitiivisteiden prässäys tulisi suorittaa automaattisesti tai puoliautomaattisesti. Kokoonpanon lopullisesta automaation tasosta ja tyypistä tulee keskustella käyttäjien kanssa. Tällä tavoin saadaan rakennettua käyttäjille mieluinen työpiste.

Työssä viitattiin useasti tehtaan valmistuspuolella sovellettavaan automaatioon. Koneistamossa automaatiota sovelletaan useissa kohteissa ja siellä on käytössä menetelmiä, jotka sopisivat pienillä muutoksilla myös kokoonpanon käyttöön. Työssä havaittiin, että kokoonpanotyön kuormittavuuden puolesta niiden soveltamiselle olisi myös selvät perusteet. Huomion arvoista on myös se, että tarkasteltavana oli vain yksi malli. Vastaavilla tai lähes vastaavilla tavoilla kootaan myös muita saman kokoluokan yksiköitä. Täten olisi myös syytä tutkia, mitä hyötyjä linjan modernisoinnilla voitaisiin myös taloudellisesti saavuttaa.

Edellä esiteltyihin havaintoihin päädyttiin seuraavien tutkimuskysymysten avulla. Tutkimuskysymys 1 oli seuraava: ”Kuinka tutkittavan ruuvikompressorin rakenne noudattaa DFA- suunnitteluohjeistuksia?”. Kysymystä tarkasteltiin kirjallisuuskatsauksen avulla. Kerätyn aineiston avulla saatu suunnittelun tehokkuuden arvo ≈ 35 % on hyvä tulos. Usein lähtötilanteessa lukema on noin 3–12 % luokkaa. Tämän lisäksi kiinnittämisen suhteeksi saatu ≈ 1,15 on erinomainen tulos lähtötilanteeseen. Ihannearvon ollessa 1 ja uudelleensuunnittelun raja-arvon ollessa 1,5. Tämän lisäksi, luvussa 5 toteutettu ruuviyksikön yksityiskohtainen suunnittelun arviointi osoitti kompressorin sisältävän pääosin hyvää suunnittelua. Tuotteesta löydettiin myös kehityskohteita, joihin työssä on tarjottu kehitysideoita. Rakenteen suunnittelun arviointi on kohdeyritykselle tärkeää, sillä tuotteen rakenteeseen tehtävä kehitystyö on aina hyödyllistä. Suunnittelua tulee myös tarkastella eri näkökulmista. Ruuviyksiköitä yleisesti suunnittelevan henkilön on helppo turvautua tuttuihin menetelmiin. Tästä syystä on hyödyllistä, että tuotetta arvioi myös normaalista suunnitteluosastosta erillinen henkilö, joka toteuttaa arvioinnin normaalista poikkeavin menetelmin.

Tutkimuskysymys 2 oli seuraava: Miten automaatiolla voitaisiin parantaa työolosuhteita? Menetelminä tarkastelussa käytettiin toimintatutkimusta sekä kirjallisuuskatsausta. Teoriaosuudessa kartoitettiin, kuinka automaatiolla voidaan parantaa työolosuhteita teollisuuden kokoonpanoprosesseissa. Merkittävimmäksi asiaksi nousi automaation edut raskaissa sekä toistuvissa toimenpiteissä. Automaation tulee tukea ihmisen työn tekemistä niin, että ihmisen ei tarvitse suorittaa näitä tehtäviä. Ihmistä tulisi hyödyntää tarkkuutta ja tuntumaa vaativissa toimenpiteissä.

Työssä suoritetun kyselytutkimuksen perusteella raskaisiin toimenpiteisiin luotiin kehitysehdotuksia. Kehitysehdotuksien tärkeimpänä tehtävänä on parantaa mahdollisuutta soveltaa automaatiota tulevaisuudessa. Merkittäviä kehitysehdotuksia onnistuttiin luomaan sokkien tyyppiin sekä niiden asennustoleransseihin. Kerätyn aineiston perusteella mahdollisimman väljät sovitteet helpottavat automaation käyttöönottoa, sekä tarvittavien työkalujen määrää. Useat kokoonpantavista kappaleista ovat käsiteltävissä helposti automaation avulla, osaan menetelmät ovat jo olemassakin tehtaan koneistamossa. Erityisesti painavimpien kappaleiden kuten roottoreiden sekä rungon käsittelyyn on jo olemassa työhön soveltuvat tarttujat.

Kuormittavuudeltaan vaativien lyömisprosessien vähentämiseksi työssä ratkaistiin voimat, jolla laakereita voitaisiin asentaa laakeripesiin. Vastaavat voimat ratkaistiin myös laakereiden sisäkooleille, sillä asennusperiaate on sama. Tulokset edesauttavat tarvittavien asennustyökalujen mitoittamista. Lisäksi vaaratilanteita aiheuttaneeseen välyksenmittaukseen luotiin työkalu, jonka avulla saadaan kartoitettua merkittäviä tuloksia tulevaisuuden automaatiota varten. Saadut tulokset ovat tärkeitä, sillä ne edesauttavat automaation käyttöönottoa kriittisissä työvaiheissa.

Tutkimuskysymys 3 oli seuraava: Mitkä kokoonpanoprosessin vaiheet aiheuttavat käyttäjille merkittävää kuormitusta? Menetelmänä tarkastelussa käytettiin kyselytutkimusta. Kyselytutkimuksessa eniten ääniä saivat lyöntioperaatiot. Erityisesti esille nousi sokkien vasarointi yksikköön. Saadut tulokset ovat kohdeyritykselle merkittäviä, koska se antaa tärkeää tietoa kokoonpanon kuormittavimmista prosesseista. Tämä antaa mahdollisuuden kohdistaa kehitystyötä kuormittavuuden kannalta tärkeimpiin kohteisiin.

8. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä käsiteltiin kokoonpanon työolosuhteita ja kokoonpantavuuden helppoutta. Tarkoituksena oli kartoittaa kokoonpanoprosessin ongelmakohtia, sekä yksinkertaistaa tuotteen kokoonpantavuutta. Kokoonpanon yksinkertaistamisella pyrittiin saavuttaa paremmat työolosuhteet, nopeammat valmistusajat, parempi laatu sekä sen avulla voidaan luoda perusta automaation soveltamiselle kokoonpanotyössä. Kokoonpanon tarkastelun tueksi tutkittiin kokoonpanossa käytettäviä menetelmiä ja tutkittiin käyttäjien kokemuksia niihin liittyen. Diplomityö on aihealueeseen nähden varsin suppea teos ja tutkimusta jouduttiin rajaamaan esitettyihin tapauksiin. Se sisältää kuitenkin arvokasta tietoa kokoonpanon nykytilanteesta ja kuinka sitä voitaisiin kehittää nyt ja tulevaisuudessa. Työssä on esiteltynä kokoonpanon nykyinen rakenne, sekä arviointia nykyisistä kokonpanometodeista. Työtä voidaan täten soveltaa vertailupohjana ja ohjeistuksena, kun kokoonpanon kehitystyötä jatketaan.

Työolosuhteiden tutkimisen näkökulmasta tutkimusta voidaan pitää onnistuneena. Kyselytutkimuksessa onnistuttiin selvittämään prosesseja, jotka käyttäjät kokivat ergonomialtaan tai turvallisuudeltaan ongelmallisiksi. Puutteiden löytyminen itsessään ei ole hyvä asia, mutta niiden havaitseminen on ensimmäinen askel kohti uusia menetelmiä. Työssä on tarjottu myös uusia ehdotuksia ja ratkaisuita työvaiheiden suorittamisen parantamiseksi. Kaikkiin ongelmakohtiin ei kuitenkaan onnistuttu tekemään merkittäviä muutoksia tai ehdotuksia. Osa prosesseista vaatisi kokoonpanoprosessin täydellistä uudelleensuunnittelua. Tämä on todennäköisesti edessä, mikäli tuotteen kokoonpanoa päädytään tulevaisuudessa automatisoimaan. Tuotteen hyvän suunnittelun takia tutkimuksessa päädyttiin tarkemmassa tarkastelussa kokoonpanomenetelmien analysointiin.

Työssä päästiin asetettuihin tavoitteisiin. Perimmäisenä tarkoituksena oli kerätä tietoa, jota voidaan hyödyntää, kun yksikön kokoonpanon automatisointi nähdään ajankohtaiseksi. Kokoonpanon rakenteesta onnistuttiin keräämään arvokasta tietoa, kuormittavimmat prosessit onnistuttiin löytämään sekä perusteltuja kehitysehdotuksia onnistuttiin luomaan. Täten työn voidaan katsoa saavuttaneen tavoitteet. Myös kohdeyritys on tyytyväinen työn tuloksiin. Aiheen seuraamista, tutkimista ja kehittämistä tulee jatkaa. Erityisesti lyöntityökalujen käytöstä tulee päästä eroon. Yhtenä merkittävimmistä syistä on tietysti työn ergonomia. Huomioitavaa on lisäksi se, että koneistamon puolella kokoon-

pantavia kappaleita valmistetaan jopa millin tuhannesosien tarkkuudella. Kokoonpanossa kuitenkin yksi asennuksen käytetyimmistä työkaluista on vasara. On selvää, että tästä on päästävä eroon sekä tuotteen laadun, että käyttäjien kannalta.

Laajana jatkotutkimuskohteena aiheeseen liittyen olisi tutkia sopivaa automaation tasoa lopullisessa kokoonpanossa, jota kohti halutaan tulevaisuudessa edetä. Linjan täydellinen uudelleen toteuttaminen yhdellä kertaa tuskin tulee olemaan seuraava vaihe kokoonpanossa. Kokoonpanoa tulee täten lähteä automatisoimaan vaihe kerrallaan, tarpeellisimmista vaiheista lähtien. Kuitenkin niin, että lopullinen tavoite on selkeä. Näin vältetään kompleksinen järjestelmä ja tarpeeton uudelleensuunnittelu. Teknisen suunnittelun lisäksi suunnitteluvaiheessa tulisi hyödyntää myös yrityksen työergonomiaan erikoistunutta henkilöstöä, jottei päädytä luomaan vastaavia ongelmia uuteen työympäristöön.

Tärkeimmät yksittäiset jatkotutkimuskohteet itse kokoonpanoprosessista löytyvät lyöntityökaluista. Tärkeimpänä olisi tutkia ehdotettujen DIN 7343 jousisokkien soveltuvuutta yksikön kokoonpanossa. Jousisokkia tulee hankkia ja niiden asennusta tulee koekäyttää prototyyppityökalujen avulla. Jos tästä saadaan hyviä kokemuksia, tulee siirtyä sokkien koekäyttöön yksiköissä. Ehdotuksena on, että lyöntityökaluista tulisi päästä ensimmäisenä eroon kokoonpanossa. Täten jousisokkien testaamisen lisäksi tulisi selvittää, millä tavoin koolien ja laakereiden kiinnittäminen tulisi suorittaa. Asennus tulee suorittaa tulevaisuudessa työssä ehdotetulla menetelmällä. Siihen tarvittavien työkalujen mitoittamiseen voidaan hyödyntää työssä laskettuja arvoja. Tämän lisäksi tulee suunnitella tarvittavat asennusjigit ja materiaalin syöttötapa. Roottoreiden käsittelyssä voidaan hyödyntää koneistamossa toimiviksi todettuja tarttujia.

Muita jatkotutkimuksen kohteita ovat esimerkiksi rungon kiinnittämisen menetelmä sekä tulevaisuuden kokoonpanotelineen optimaalisen rakenteen määrittäminen. Lisäksi suunniteltua välyksenmittaamiseen tarkoitettua työkalua tulee koekäyttää ja tuloksia seurata. Jos tulokset ovat lupaavia, tulee menetelmää kehittää edelleen. Lopullinen maali on tuottaa työkalu, jonka avulla vähintään mittausvaihe saataisiin automatisoitua. Työkalun on tulevaisuudessa tarkoitus toimia ulkoisella voimalla kuten hydrauliikan tai paineilman avulla.

Kokoonpantavuuden tarkasteluun liittyvien lähteiden hankkiminen osoittautui odotettua haastavammaksi työvaiheeksi. DFA menetelmiin liittyen löytyy kyllä teoksia. Useat teoksista kuitenkin kertaavat samoja manuaaliseen kokoonpanoon suunniteltuja ohjeistuksia. Tuotteen suunnittelusta automaattiseen kokoonpanoon oli haastavaa löytää tietoa viimeisen 10 vuoden ajalta. Useat kattavimmista teoksista olivat aiheen aikaherkkyyteen

nähden vanhoja. Tämän lisäksi lukemattomat teokset rakentuvat täysin saman lähteen ympärille, jolloin asiaa tarkastellaan liikaa yhdestä näkökulmasta. Vanhemmista teoksista sai ammennettu silti hyödyllistä informaatiota. Sillä suunnittelun perusteet eivät juuri muutu, vaikka aikaa olisi mennyt pidempäänkin. Kuten työn teoriaosuudessa esitettiin: manuaalisen kokoonpanon ohjeistuksien mukaan suunnitteleminen hyödyttää myös silloin, kun suunnitellaan automaatioita varten.

Yhteistyörobottien soveltaminen yksiköiden kokoonpanossa sisältää kohteeseen soveltuvia mahdollisuuksia. Kokoonpano sisältää vaadittujen tarkkuuksien vuoksi vaativia tehtäviä, jotka vaativat erityistä tarkkuutta ja kykyä mukautua tilanteisiin. Tämän lisäksi se sisältää ihmiselle painavia elementtejä ja voimaa vaativia toimenpiteitä. Täten optimaalisin ratkaisu tulisi muodostua seuraavien ajatusten ympärille: kone suorittaa yksinkertaiset ja voimaa vaativat tehtävät. Tarkkuutta, tuntumaa ja erityistä ammattitaitoa vaativat työvaiheet tulisi jättää käyttäjien tehtäviksi.

LÄHTEET

Ai, X. (2013) 'Rolling Element Bearing Mounting and Fitting Practice', in Q.J. Wang and Y.-W. Chung (eds) *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA: Springer US, s. 2916–2922. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_355.

Andreasen, M.M. & Myrup, M. (1988) *Design for Assembly*. Berlin: SpringerVerlag.

Battini, D. *et al.* (2011) 'New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design', *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1), s. 30–42. Saatavissa: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.12.001.

Becker, C. & Scholl, A. (2006) 'A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing', *European Journal of Operational Research*, 168(3), s. 694–715. Saatavissa: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023.

Bogue, R. (2012) 'Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications', *Assembly Automation*, 32(2), s. 112–118. Saatavissa: https://doi.org/10.1108/01445151211212262.

Booker, J.D., Swift, K.G. & Brown, N.J. (2005) 'Designing for assembly quality: strategies, guidelines and techniques', *Journal of Engineering Design*, 16(3), s. 279–295. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/09544820500126672.

Boothroyd, G. (2005) *Assembly automation and product design*. Florida: Taylor & Francis Group.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. & Knight, W.A. (2010) *Product Design for Manufacture and Assembly*. Taylor & Francis Group.

Broberg, O. (1997) 'Integrating ergonomics into the product development process', *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19(4), s. 317–327. Saatavissa: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0169-8141(96)00041-8.

Carey, E.J. & Gallwey, T.J. (2002) 'Evaluation of human postures with computer aids and virtual workplace designs', *International Journal of Production Research*, 40(4), s. 825–843. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/00207540110093927.

Dalgleish, G.F., Jared, G.E.M. & Swift, K.G. (2000) 'Design for assembly: Influencing the design process', *Journal of Engineering Design*, 11(1), s. 17–29. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/095448200261162.

EKLUND, J. (1997) 'Ergonomics, quality and continuous improvementconceptual and empirical relationships in an industrial context', *Ergonomics*, 40(10), s. 982–1001. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/001401397187559.

Eklund, J.A.E. (1999) 'Ergonomics and Quality Management—Humans in Interaction With Technology, Work Environment, and Organization', *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 5(2), s. 143–160. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/10803548.1999.11076416.

Eskilander, S. (2003) 'Design for automatic assembly. A method for product design: DFA2.'

Eteläaho, P., Ihalainen, R. & Järvelä, P. (1999) *DFA suunnitteluapuvälineenä*. Tampere.

Falck, A., Örtengren, R. & Högberg, D. (2010) 'The impact of poor assembly ergonomics on product quality: A cost–benefit analysis in car manufacturing', *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 20(1), s. 24–41.

Falck, A.-C., Örtengren, R. & Rosenqvist, M. (2014a) 'Assembly failures and action cost in relation to complexity level and assembly ergonomics in manual assembly (part 2)', *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(3), s. 455–459. Saatavissa: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.02.001.

Falck, A.-C., Örtengren, R. & Rosenqvist, M. (2014b) 'Assembly failures and action cost in relation to complexity level and assembly ergonomics in manual assembly (part 2)', *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(3), s. 455–459.

Falck, A.-C. & Rosenqvist, M. (2014) 'A model for calculation of the costs of poor assembly ergonomics (part 1)', *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(1), s. 140–147. Saatavissa: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.11.013.

Fasth-Berglund, Å. & Stahre, J. (2013) 'Cognitive automation strategy for reconfigurable and sustainable assembly systems', *Assembly automation* [Preprint].

Gervasi, R. *et al.* (2023) 'Manual assembly and Human–Robot Collaboration in repetitive assembly processes: a structured comparison based on human-centered performances', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 126(3), s. 1213–1231. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/s00170-023-11197-4.

Grandjean, E. & Kroemer, K.H.E. (1997) *Fitting the task to the human: a textbook of occupational ergonomics*. CRC press.

Greenwood, J. (2020) *How to Select the Proper Pin for Your Application*. Saatavissa: https://www.spirol.com/assets/files/cldp-wp-how-to-select-the-proper-pin-for-your-application-us.pdf

Groover, M. (2001) *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. 2nd edn. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

Gualtieri, L. *et al.* (2020) 'Safety, ergonomics and efficiency in human-robot collaborative assembly: design guidelines and requirements', *Procedia CIRP*, 91, s. 367–372.

Huang, G.C. (1996) *Design for X: Concurrent engineering imperatives*. Dundee: Springer - science + business media, B.V.

Huang, G.Q. & Mak, K.L. (1999) 'Design for manufacture and assembly on the Internet', *Computers in Industry*, 38(1), s. 17–30. Saatavissa: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0166-3615(98)00105-5.

International Organization for Standardization (2019) 'SFS-EN ISO 9241-210:2019 – Ihmisen ja järjestelmän vuorovaikutuksen ergonomia. Osa 210: Vuorovaikutteisten järjestelmien käyttäjäkeskeinen suunnittelu'.

Koren, Y. (2010) *The Global Manufacturing Revolution : Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*. Hoboken, UNITED STATES: John Wiley & Sons, Incorporated. Saatavissa: http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=533965.

Krüger, J., Lien, T.K. & Verl, A. (2009) 'Cooperation of human and machines in assembly lines', *CIRP annals*, 58(2), s. 628–646.

Kumar, S. (1998) *Advances in Occupational Ergonomics and Safety: Proceedings of the XIIIth Annual International Occupational Ergonomics and Safety Conference 1998*. IOS Press.

Leaney, P.G. & Wittenberg, G. (1992) 'Design For Assembling', *Assembly Automation*, 12(2), s. 8–17. Saatavissa: https://doi.org/10.1108/eb004359.

Lempiäinen, J. & Savolainen, J. (2003) *Hyvin suunniiteltu - puoliksi valmistettu*. Hakapaino Oy.

Lindström, V. & Winroth, M. (2010) 'Aligning manufacturing strategy and levels of automation: A case study', *Journal of engineering and technology management*, 27(3–4), s. 148–159.

El Makrini, I. *et al.* (2017) 'Design of a collaborative architecture for human-robot assembly tasks', in *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE, s. 1624–1629.

Matheson, E. *et al.* (2019) 'Human–robot collaboration in manufacturing applications: A review', *Robotics*, 8(4), s. 100.

Matuszek, J. *et al.* (2020) 'Manufacturability Assessment of the Product Assembly Processes Design in the Automotive Industry', *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 22(4), s. 112–120. Saatavissa: https://doi.org/10.26552/com.C.2020.4.112-120.

Moultrie, J. & Maier, A.M. (2014) 'A simplified approach to design for assembly', *Journal of Engineering Design*, 25(1–3), s. 44–63. Saatavissa: https://doi.org/10.1080/09544828.2014.887059.

Nof, S.Y. (2009) *Springer handbook of automation*. Springer.

NSK (2013) *Technical Report : Chapter 3 Bearing Fitting Practice*. Saatavissa: https://www.nsk.com/common/data/ctrgPdf/bearings/split/e728/nsk_cat_e728g_62-85.pdf.

Parasuraman, R. & Riley, V. (1997) 'Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse', *Human Factors*, 39(2), s. 230. Saatavissa: https://libproxy.tuni.fi/login?qurl=https%3A%2F%2Fwww.proquest.com%2Fscholarly-journals%2Fhumans-automation-use-misuse-disuse-abuse%2Fdocview%2F216444294%2Fse-2%3Faccountid%3D14242.

Parasuraman, R., Sheridan, T.B. & Wickens, C.D. (2000) 'A model for types and levels of human interaction with automation', *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 30(3), s. 286–297.

Petzoldt, C. *et al.* (2022) 'Implementation and Evaluation of Dynamic Task Allocation for Human–Robot Collaboration in Assembly', *Applied Sciences*, 12(24), s. 12645. Saatavissa: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app122412645.

Scarr, A., Jackson, D. & McMaster, R. (1986) 'Product design for robotic and automated assembly', in *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, s. 796–802. Saatavissa: https://doi.org/10.1109/ROBOT.1986.1087581.

Smith, A.P. & Jones, D.M. (1992) 'Noise and performance', *Handbook of human performance*, 1, s. 1–28.

Soon, T.J. (2008) 'QR code', *synthesis journal*, 2008, s. 59–78.

Tamrotor (2019) 'Tamrotor product presentation'. Tampere.

Wang, L. *et al.* (2019) 'Symbiotic human-robot collaborative assembly', *CIRP annals*, 68(2), s. 701–726.

Winner, R.I. *et al.* (1988) *The role of concurrent engineering in weapons system acquisition*. Institute for Defense Analyses Alexandria VA.

Zhu, X. *et al.* (2008) 'Modeling of Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines', *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(5). Saatavissa: https://doi.org/10.1115/1.2953076.