

Aleksi Paakkinen

TUOTTEEN SUUNNITTELU KOKOONPANON NÄKÖKULMASTA

Vertailu automaattisen ja manuaalisen
kokoonpanon välillä

Kandidaatintyö
Teknisten tieteiden tiedekunta
Tarkastaja: yliopistotutkija Eeva Järvenpää

Kevät 2020

TIIVISTELMÄ

Aleksi Paakkinen: Tuotteen suunnittelu kokoonpanon näkökulmasta – vertailu automaattisen ja manuaalisen kokoonpanon välillä

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, konetekniikka

Huhtikuu 2020

Kokoonpanon asettamat rajoitukset on hyvä ottaa huomioon tuotteen suunnittelussa. Suunnitelmalla tuote sopivaksi kokoonpanoprosessiin ja sen järjestelmiin auttaa yritystä alentamaan tuotteen tuotantokustannuksia. Kokoonpanoprosessia voidaan helpottaa huomattavasti ottamalla se huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Suurin yksittäinen tekijä kokoonpanon helpottamiselle on tuotteen osien määrän vähentäminen.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan Design for Assembly-kokoonpanoajattelua (DFA). Keskeinen tutkimuskysymys on se, onko perusteltua suunnitella tuote eri ohjeistusta käyttäen riippuen siitä, kokoonpannaanko sitä manuaalisesti vai automaattisesti. Aineistona käytettiin alan kirjallisuutta sekä suomen- että englanninkielisistä lähteistä. Työssä esitellään DFA-ajattelun perusteet ja tavoitteet, jotka ovat kustannusten vähentäminen sekä kokoonpanon helppous. Nämä sisältävät useita osa-alueita, joihin huomiota kiinnittämällä päästään paremmin kokoonpantavuuteen. Osa-alueisiin sisältyy osien määrä, kokoonpanosuunnat, kiinnitystavat, orientoitavuus, syöttäminen, toleranssit sekä modulaarisuus. Alan tutkijat ovat kehittäneet monia erilaisia DFA-menetelmiä, joita voidaan käyttää hyväksi tuotteen suunnittelun aikana sen kokoonpantavuuden parantamiseksi. Nämä menetelmät sisältävät omat pisteytysjärjestelmänsä, joilla arvioidaan tuotteen hyvyttä kokoonpanon kannalta. Viimeisenä teoriaosuutena tutkitaan erilaisia kokoonpanojärjestelmiä ja niiden ominaispiirteitä. Lopuksi muodostetaan teorian pohjalta vertailu manuaalisen kokoonpanon ja automaattisen kokoonpanon välille nimenomaan DFA:n näkökulmasta.

Vertailun tuloksena löydettiin jonkin verran eroavaisuuksia. Suurimmat eroavaisuudet tulevat osien soveltuvuudesta automaatiolaitteiston käsittelyyn. Osien täytyy olla helppoja orientoida ja syöttää robotille, eivätkä ne saa sotkeutua keskenään. Ihminen pystyy käsin tekemään paljon joustavampia liikkeitä kuin mikään robotti. Ihmisen arviointikyky ja toiminta vaihtelevassa ympäristössä on valtavasti joustavampi kuin robotin, jonka jokainen liike on ohjelmitava erikseen.

Avainsanat: Design for Assembly, DFA, tuotesuunnittelu, kokoonpano

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on kirjoitettu Tampereen yliopistossa. Työn aihe on valittu yhdessä ohjaajani Eeva Järvenpään kanssa ja tahdon kiittää häntä ohjeistuksesta ja suunnan näyttämisestä työn edetessä. Tahdon myös kiittää läheisiäni kannustuksesta työn aikana.

Tampereella, 27.4.2019

Alexi Paakkinen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
2.	KOKOONPANTAVUUDEN SUUNNITTELU	2
2.1	Historia.....	2
2.2	Tarkoitus ja tavoitteet	2
2.3	Kokoonpantavuuden osa-alueet	4
2.3.1	Osien määrä	4
2.3.2	Kokoonpanojärjestys ja -suunnat	5
2.3.3	Kiinnitystavat ja osien asentaminen	6
2.3.4	Käsiteltävyys	7
2.3.5	Orientoitavuus.....	9
2.3.6	Syöttäminen	11
2.3.7	Toleranssit	13
2.3.8	Modulaarisuus	14
2.4	DFA-menetelmät	15
2.4.1	Boothroyd & Dewhurst DFMA	15
2.4.2	Hitachi AEM	16
2.4.3	Lucas DFA	17
2.4.4	DFA2.....	18
3.	KOKOONPANOJÄRJESTELMÄT	20
3.1	Manuaalinen kokoonpano	20
3.2	Automaattinen kokoonpano	21
3.2.1	Jäykkä kokoonpanoautomaatio.....	21
3.2.2	Joustavat automaattiset kokoonpanojärjestelmät.....	21
4.	DFA:N VERTAILU ERI KOKOONPANTAVOILLA.....	23
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET	25
	LÄHTEET	26

1. JOHDANTO

Hyvillä suunnittelupäätöksillä saadaan vähennettyä tuotteen osien määrää ja sitä myöten kokoonpanovaiheiden määrää sekä niistä aiheutuvia kustannuksia. Olkoon kyseessä sitten automaattisesti toteutettu kokoonpano tai manuaalisesti tehtävä kokoonpano, sitä mahdollisimman paljon yksinkertaistamalla saadaan nopeampi läpimenoaika tuotteelle. Tämän ansiosta tuotteen kokoonpanokustannukset pienenevät ja tuote saadaan markkinoille kuluttajaystävällisempään hintaan. Yleisesti on pidetty selvänä, että suunniteltaessa tuotteen kokoonpantavuutta, kannattaa se tehdä automaattisen kokoonpanon antamien suuntaviivojen mukaisesti, vaikka tuotetta ei aiotakaan koota automaattisesti (Metalliteollisuuden keskusliitto 1988, s. 3). Tämä ajattelutapa on luotu siksi, että jos tuotetta joskus alettaisiin kokoonpanemaan automaattisesti, se olisi heti valmis myös siihen ilman suurempia tuotemuutoksia.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, onko tuotteen kokoonpantavuutta suunniteltaessa perusteltua käyttää eri suunnitteluohjeistusta jos tiedetään ja uskotaan tuotteen olevan aina manuaalisesti kokoonpantava. Työssä myös tutkitaan, millaisilla suunnittelupäätöksillä voidaan vaikuttaa kokoonpanoprosessin sujuvuuteen ja kustannuksiin. Tutkimusmenetelmänä työssä on kirjallisuustutkimus. Työssä ei käsitellä kuitenkaan tuotteen osien valmistettavuutta, Design for manufacturing, eikä myöskään oteta kantaa tuotteen purkamiseen.

Aluksi käsitellään Design for Assembly–kokoonpanoajattelun (DFA) perusteita, mistä se on lähtenyt liikkeelle ja mitkä ovat sen päätarkoituksia sekä -tavoitteita. Seuraavaksi käydään läpi kokoonpantavuuden määrittely ja mitä asioita täytyy ottaa huomioon suunniteltaessa helposti kokoonpantavaa tuotetta. Luvussa 2.3 käydään läpi osien määrän vaikutus, tuotteen modulaarisuus, kokoonpanojärjestyksen ja kokoonpanosuuntien vaikutukset, orientoitavuus, käsiteltävyys, toleranssit sekä osien syöttäminen. Nämä osa-alueet antavat pohjan luvulle 2.4, jossa käydään läpi muutama yleisimmin käytetty menetelmä, jotka on kehitetty parantamaan tuotteiden kokoonpantavuutta tuotteen osia analysoimalla. Kolmas luku käsittelee erilaisia kokoonpanojärjestelmiä. Lopuksi vertaillaan DFA:n eroavaisuuksia manuaalisen kokoonpanon ja automaattisen kokoonpanon välillä ja vastataan tutkimuskysymykseen, onko niissä mitään eroja.

2. KOKOONPANTAVUUDEN SUUNNITTELU

2.1 Historia

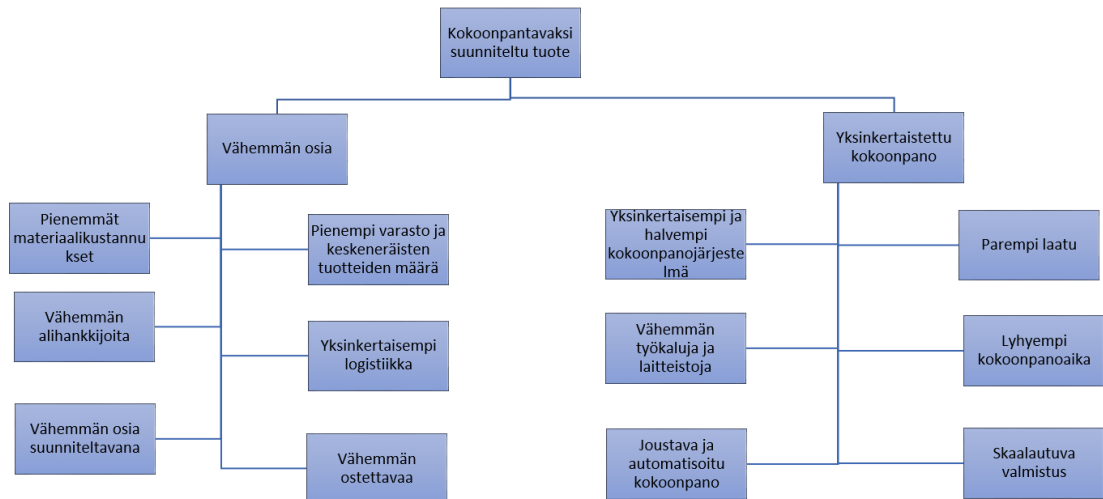
1970-luvun lopulla ja 1980-luvun alussa teollisuusrobotiikan kehittymisen myötä tuotteen kokoonpantavuutta alettiin tutkia. Silloin nähtiin, että monien tuotteiden manuaalinen kokoonpano on mahdollista toteuttaa automaattisesti. (Lempiäinen & Savolainen 2004) Tämän johdosta alettiin tutkia, miten kokoonpanokustannuksia saataisiin alaspäin ja miten kappaleen käsittely ja niiden liittäminen olisi mahdollisimman helppoa ja yksinkertaista.

Etenkin Boothroydin ja Dewhurstin tutkimukset ovat luoneet perusteellisen perustuksen kaikelle DFA-ajattelulle, ja heidät nähdään alan avainpioneereina (Moultrie & Maier 2014; El-Nounu et al. 2017). Jo ensimmäisten tutkimusten periaatteet ovat nykypäivänäkkin vahvasti voimassa, sekä kaikki uudemmat menetelmät perustuvat näihin (Moultrie & Maier 2014).

2.2 Tarkoitus ja tavoitteet

Design for Assembly -tuotekehitysmenetelmän tavoitteena on yksinkertaistaa tuotteen rakennetta siten, että sen kokoonpantavuus helpottuu. Tämä onnistuu useimmiten yhdistelemällä osia toisiinsa tai yhdistämällä useampi toiminto yhdeksi osaksi. Tämä vähentää tuotteen osien lukumäärää ja täten lisää tuotteen luotettavuutta, helpottaa sen huollettavuutta ja pienentää sen ympäristökuormitusta. (Lempiäinen & Savolainen 2004) Mital et al. (2008, s. 136) kertoo DFA:n periaatteiden käytön yleensä johtavan parantuneeseen laatuun, luotettavuuteen sekä vähennykseen tuotantolaitteissa sekä osien määrässä.

DFA:n kulmakivet ovat osa-alueita, joita huomioimalla suunnitteluvaiheessa voidaan saavuttaa parempi kokoonpantavuus. Näitä käsitellään seuraavissa luvuissa. Kuvassa 1 nähdään suurimmat DFA:n käytöllä saavutettavat hyödyt tuotannossa (Eskilander 2001, s. 28).



Kuva 1: DFA:n käytön hyödyt tuotannon kannalta (muokattu lähteestä Eskilander 2001, s. 28)

Kaikki osat, jotka tuotteessa saadaan poistetuksi yhdistämällä ne toisiinsa, vähentävät niiden valmistuksen tarpeen, varastoinnin tarpeen ja käsittelyn tarpeen. Osia voidaan yhdistää siten, että yhden osan funktio saadaan liitettyä osaksi toista osaa yksinkertaisella muutoksella. Yksi tärkeimmistä DFA-ajattelun kulmakivistä on saada tuotteen kokoonpano halvemmaksi (Boothroyd et al. 2010, s. 73; Favi & Germani 2012; El-Nounu et al. 2017). Mitä vähemmän tuotteessa on osia, sitä vähemmän siinä on kokoonpanovaiheita ja sitä myöten siihen menee vähemmän aikaa. Mitä yksinkertaisempi tuotteen kokoonpano on, sitä pienemmät tuotantotilat tarvitaan, koska osat vievät vähemmän tilaa ja yksinkertaisemmat kokoonpanosolut ja -laitteet vievät vähemmän tilaa. Tuotteen suunnittelulla on suuri vaikutus tuotteen elinkaaren hintaan, jopa 60–70 prosenttia (Boothroyd et al. 2010; El-Nounu et al. 2017). Lapinleimu et al. (1997, s. 111) kertoo kokoonpanon osuudeksi työtunneista ja työkustannuksista olevan yleisesti noin 20–40 %. Syyt kokoonpanon suureen osuuteen tuotteen kustannuksista periytyvät sitä edellisistä vaiheista, kuten suunnittelusta, jossa kokoonpantavuutta ei olla otettu tarpeeksi huomioon (Lapinleimu et al. 1997, s. 112).

2.3 Kokoonpantavuuden osa-alueet

2.3.1 Osien määrä

Yksi suurimmista tekijöistä kokoonpanon monimutkaisuudessa on kokoonpantavien osien määrä. Boothroyd et al. (2010, s. 82) esittävät 3 kysymystä, jotka otetaan huomioon kun mietitään, voiko osaa yhdistää toiseen:

- Täytyykö osan liikkua suhteessa muihin jo kokoonpantuihin osiin?
- Täytyykö osa olla eri materiaalia tai erillään muista jo kokoonpannuista osista?
- Täytyykö osa olla erillään muista osista, koska muuten se estää muiden osien kokoonpanon tai tarvittavan purkamisen myöhemmin esimerkiksi huoltotoimenpiteitä varten?

Jos vastaus yhteenkin näistä on myönteinen, osien yhdistämistä ei voida harkita. Jokaisella poisjätetyllä osalla on vaikutus tuotteen kiinteisiin kuluihin. Poistettavaa osaa ei tarvitse suunnitella, valmistaa ja testata, varastoida, ostaa, kuljettaa, kierrättää ja hävittää. Vähentämällä osia saadaan vähennettyä taloudellisen siivunsa ottavien alihankkijoiden määrää sekä tarvittavaa logistiikkaa osien kuljettamiseksi esimerkiksi alihankkijoilta kokoonpanotehtaalle. Alaluvussa 2.4 esiteltävistä DFA-menetelmistä erityisesti Boothroydin ja Dewhurstin menetelmä perustuu osien lukumäärän vähentämiseen.

Boothroyd et al. (2010, s. 110) mukaan erityisesti liitososia vähentämällä saadaan helposti vähennettyä osien määrää. Jos jonkin osan ainoa tarkoitus on liittää osa A osaan B, kannattaa pyrkiä sijoittamaan A ja B siten, että ne ovat vierekkäin ja voidaan yhdistää ilman erillisiä liitososia.

Tuotteen osien määrä vaikuttaa merkittävästi sen laadullisiin ominaisuuksiin. Mitä vähemmän on osia, sitä vähemmän on osia, jotka voivat mennä rikki tai voidaan asentaa väärin. Väärin asentamisen mahdollisuuden poistaminen on toki yleisestikin suunnitteluisinööriin perustavoite. Mitä vähemmän osia tarvitsee suunnitella, sitä enemmän niiden laatuun voidaan suunnitteluvaiheessa kiinnittää huomiota. (Boothroyd et al. 2010, s. 110)

Yksi osien määrään vaikuttava toimenpide on tuotteiden standardisointi. Tuotteessa kannattaa käyttää mahdollisimman vähän eri materiaaleja ja valmistusmenetelmiä. Tuoteperheiden eri tuotteissa kannattaa käyttää mahdollisimman paljon samoja osia.

Samanlaisia kiinnitysosia käyttämällä vältetään tarvetta vaihtaa työkalua jatkuvasti. Tiilaamalla mahdollisimman paljon eri osia samalta valmistajalta saadaan luotua vahva asiakassuhde, jonka ansiosta osia saadaan tilattua halvemmalla ja varmemmin. Esimerkiksi ohutlevy tuotteessa ei kannata olla montaa eri levypaksuutta. Tuotteen muotojen standardisointi on myös hyväksi, jos tuoteperheen tuotteita pystytään kokoamaan samassa jigissä, jolloin säästetään tilaa tuotantohallista. (Kivi 1992, s. 24–25)

Osien määrän vähentämistä ei kuitenkaan kannata liioitella. Fernandez (1993) kirjoittaa artikkelissaan, että liian monimutkaiset ja monifunktioniset osat voivat tulla liian hankaliksi valmistaa esimerkiksi toleranssien näkökulmasta. Esimerkkinä Fernandez esittää tapauksen, jossa kolme koneistettua osaa korvataan yhdellä valmiiksi muottiin valetulla osalla, ja lopputuloksena osa on liian kallis valmistaa.

2.3.2 Kokoonpanojärjestys ja -suunnat

Niin ihmiselle kuin kokoonpanorobotille luontaisin kokoonpanosuunta on suoraan ylhäältä alaspäin. Tähän täytyy aina pyrkiä tuotetta suunnitellessa (Boothroyd et al. 2010, s. 77, 201). Jos osaa tarvitsee käänellä sen kiinnittämiseksi, kokoonpanolaitteeseen tarvitaan lisää vapausasteita ja myös manuaalikokoonpano hidastuu. Suurin hyöty suoraan ylhäältä alaspäin kokoonpantaessa on painovoiman hyväksi käyttäminen ohjaamaan osa oikeaan kohtaan oikeassa asennossa (Boothroyd et al. 2010, s. 201). Luvussa 2.4 esiteltävistä DFA-menetelmistä erityisesti Hitachi AEM perustuu kokoonpanosuuntien vähentämiseen.

Kokoonpanosuuntia mietittäessä on otettava huomioon, että suoraviivainen asentaminen muuten kuin suoraan ylhäältäpäin on noin 10–30 % kalliimpaa. Vielä suurempi virhe on suunnitella osa, joka asennetaan epälineaaraisesti kahdella liikkeellä. Tällainen asennus on noin 100 % kalliimpi. (Boothroyd & Dewhurst 1983, Metalliteollisuuden keskusliitto 1988 s. 8 mukaan)

Puutteellinen näkymä osan kiinnityskohtaan on tyypillinen ongelmakohta varsinkin manuaalisessa kokoonpanossa. Mitä tiukempi sovite on, sitä tärkeämpää kokoonpanijan on nähdä oikea asento osaa sovitettaessa. Tätä ongelmaa voidaan ehkäistä suunnittelemalla osan ulkopinnalle ohjaavia piirteitä, jotka ohjaavat osan hakeutumaan itsekseen oikeaan paikkaan. Tällaisia piirteitä voivat olla esimerkiksi viisteet, ohjaustapit, reiät sekä olakkeet. (Lempiäinen & Savolainen 2004, s. 73–75).

Pujotustehtävät, jotka vaativat kahta kättä, muodostavat lähes aina esteen automaattisen kokoonpanon käytölle (Lempiäinen & Savolainen 2004, s.72). Jos kokoonpano

suoraan ylhäältä ei ole mahdollista, on viisasta jakaa kokoonpano alimoduuleihin (Boothroyd et al. 2010, s. 201). Modulaarisuutta käsitellään enemmän luvussa 2.3.8.

2.3.3 Kiinnitystavat ja osien asentaminen

Boothroyd et al. (2010, s. 78) esittävät neljä eri osien kiinnitystapaa järjestyksessä halvimasta kalleimpaan. Halvin vaihtoehto on napsausliitos, joka pitää osan paikallaan. Sen jälkeen tulevat plastisen muodonmuutoksen tekeminen, erilaiset niittaustavat ja viimeisimpänä, kalleimpana kiinnitystapana ruuvikiinnitykset.

Osien paikalleen asettamiseen ja kiinnittämiseen Boothroyd et al. (2010, s. 74) listaavat 7 suunnitteluohjetta.

1. Suunnittele osa siten, että sen paikalleen laittaminen on helppoa. Tähän sisältyy esimerkiksi reunojen viisteytys, joka ohjaa osan oikeaan paikkaan.
2. Standardisoi käyttämällä samoja osia, prosesseja ja metodeita kaikissa tuotteissa.
3. Tee kokoonpanosta pyramidinomainen, eli osat voidaan koota järjestyksessä päällekkäin yhden akselin tai piirteen suhteen.
4. Vältä tarvetta pitää osasta kiinni toisella kädellä sen orientaation säilyttämiseksi toisen osan liittämisen aikana, ja suunnittele piirteitä, jotka hoitavat tämän puolestasi.
5. Suunnittele osa siten, että se löytää paikkansa ennen kuin siitä täytyy päästää irti.
6. Käytä mahdollisimman halpaa kiinnitystapaa.
7. Vältä perusosan kääntelyn ja siirtelyn tarvetta osakokoonpanon ollessa kesken.

Napsausliitoksen parhaita etuja ovat suoraviivaisen liikkeen helppo toteutus, vähäinen tilantarve, liitoksen näkymättömyys ulospäin, sekä erillisten liitososien tarpeettomuus. Erityisesti muoviosien suunnittelussa ja kokoonpanoautomaatiota käytettäessä kannattaa suosia napsausliitoksia. (Lempiäinen & Savolainen 2004, s. 112)

Liimaliitos tarjoaa etuja mekaanisiin liitoksiin verrattuna. Se tarjoaa tasaisen rasitusjakauman, tiiviin liitoksen, mahdollistaa eri materiaalien helpon liittämisen sekä vähentää osien määrää. Se on myös näkymätön liitos, mikä parantaa tuotteen ulkonäköä. (Lempiäinen & Savolainen 2004, s. 108–110)

Ruuvikiinnityksiä tulisi automaattisessa kokoonpanossa käyttää vain silloin, kun tuote on tarpeellista avata kokoonpanon jälkeen. Silloinkaan ei tulisi käyttää erillisiä aluslevyjä ruuvien kanssa, koska niiden käsittely on hankalaa. Niiden sijaan tulisi käyttää valmiita aluslevyllisiä ruuveja. Kuten myös manuaalisessa kokoonpanossa, kaikkein paras liitos on napsausliitos. (Metalliteollisuuden keskusliitto 1988, s.11)

Kiinnitystapojen miettiminen on tärkeää myös osien määrän kannalta, sillä juuri kiinnitysosat ovat niitä, joita saadaan vähennettyä ilman suurempia muutoksia tuotteen rakenteeseen (Boothroyd et al. 2010, s. 113). Napsausliitos voidaan tehdä kiinni osaan, jolloin se ei tuo kokoonpanoon yhtään lisäosaa. Pultti, mutteri ja aluslevy molemmin puolin tuovat 4 ylimääräistä osaa, jos ne voidaan korvata napsauksella. Liitoskohdat ovat myös laaturiski tuotteelle, sillä ne usein muodostavat heikon kohdan tuotteeseen. Kiinnitystapoja valitessa on myös otettava huomioon se, että koskaan ei kannata suunnitella osaa, jonka voi ostaa katalogista.

Osien kiinnittämiseen tarvittavia työkaluja tulisi olla mahdollisimman vähän erilaisia. Työkalujen, mukaan lukien erilaisten ruuvikärkien, vaihtamiseen kuluu aina oma aikansa, joka hidastaa kokoonpanotyötä. Tätä voidaan edesauttaa standardisoimalla kiinnitysosia tuotteen ja tuoteperheen sisällä. (Kivi 1992, s. 27)

Manuaalisessa kokoonpanossa täytyy olla yksi ns. runko-osa, johon muut osat kiinnitetään. Osakokoonpanoja käytettäessä runko-osa on se, jonka kiinnityskohdista osakokoonpano liitetään myöhemmin suurempaan kokonaisuuteen. Runko-osa on yleensä isoin osakokoonpanon osa, mutta poikkeuksiakin tähän voi olla. Myös automaattisessa kokoonpanossa täytyy olla yksi runko-osa. Se kiinnitetään kuljetusalustaan tukevasti, jotta se pysyy paikoillaan työpisteiden siirtojen aikana. Se on pystyttävä asemoimaan tarkasti kuljetusalustaan, jotta muut osat saadaan kiinnitettyä oikeaan kohtaan. (Metalliteollisuuden keskusliitto 1988, s. 13; Boothroyd et al. 2010, s. 202)

2.3.4 Käsiteltävyys

Tärkeä tekijä kokoonpantavuuden arvioinnissa on myös osien käsiteltävyys (engl. handling). Jos osa on erityisen pieni, kuuma, liukas, joustava, likainen tai muotonsa puolesta hankala käsitellä, se aiheuttaa hankaluuksia kokoonpanotyöhön. Boothroyd et al. (2010, s. 83) määrittelevät pienen osan siten, että sen pisin dimensio on maksimissaan 6 millimetriä. Kaikki sitä pienemmät osat ovat ihmisen sormille vaikeita käsitellä, ja tarvitsevat tartuntatyökalun. Työkalu voi olla esimerkiksi pinsetit, pihdit tai ruuvauskoneen magneettinen kärki.

Tärkeää on myös ihmisen työergonomia. Kokoonpanijan terveyden ja hyvinvoinnin kannalta kokoonpanotyö täytyy pystyä suorittamaan niin, ettei tarvitse kurotella tai työskennellä hankalissa asennoissa. Tähän sisältyy myös hankalan muotoiset osat, joiden liikuttelu on vaivalloista ja niitä tulisi välttää.

Käsiteltävyyttä parantaa se, että valmistuksen jälkeen osat on kunnolla puhdistettu kaikesta liasta ja jäysteestä, jotta sitä ei jouduta kokoonpanovaiheessa tekemään uudestaan. Myös varastoinnin aikana osan pintaan tarttuva pöly voi vaikeuttaa kokoonpanossa osan käsiteltävyyttä.

Käsiteltävyyttä on mahdollista helpottaa valmistamalla ylimääräisiä piirteitä kappaleen ulkopinnalle, etenkin automaattikokoonpanossa. Esimerkkeinä näistä kielekkeet, joiden alapuolelta nostamalla voi liikuttaa kappaletta. Toinen vaihtoehto voisi olla koukut tai kolot, joista kappaletta voidaan nostaa. Tartuntapintojen suunnittelu on tärkeää automaattille. Osassa tulee olla kohtisuorat pinnat, tartuntareivät tai -tapit, jos käytetään mekaanista tarttujaa. Myös magneettinen tai alipainetartunta on mahdollinen vaihtoehto. (Metalliteollisuuden keskusliitto 1988, s. 31)

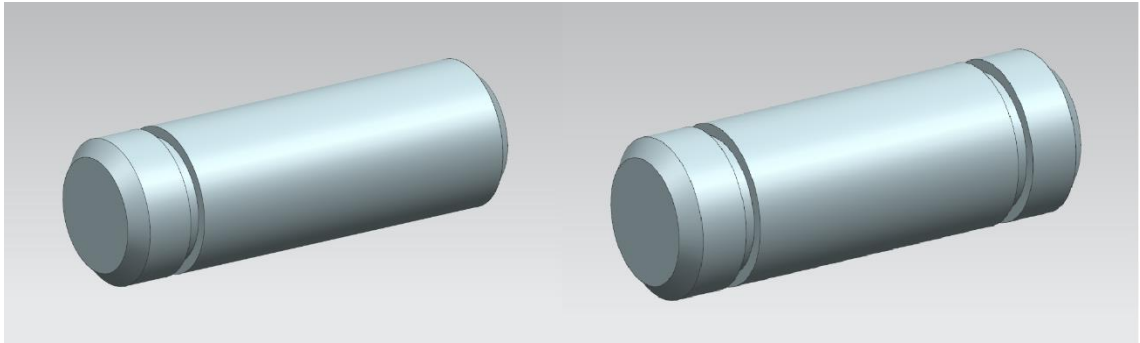
Boothroyd et al. (2010, s. 74) esittää, että manuaalisen kokoonpanoprosessin voi jakaa kahteen alueeseen: osien käsittelyyn sekä niiden paikalleen asettamiseen ja kiinnitykseen. Osien käsittely sisältää niiden hankkimisen, siirtelyn sekä kääntelyn. Osan paikalleen asettaminen ja kiinnitys tarkoittaa osan liittämistä muihin jo koottuihin osiin.

Osien käsittelyn helpottamiseksi Boothroyd et al. (2010, s. 74) esittävät 5 yleistä suunnitteluohjetta.

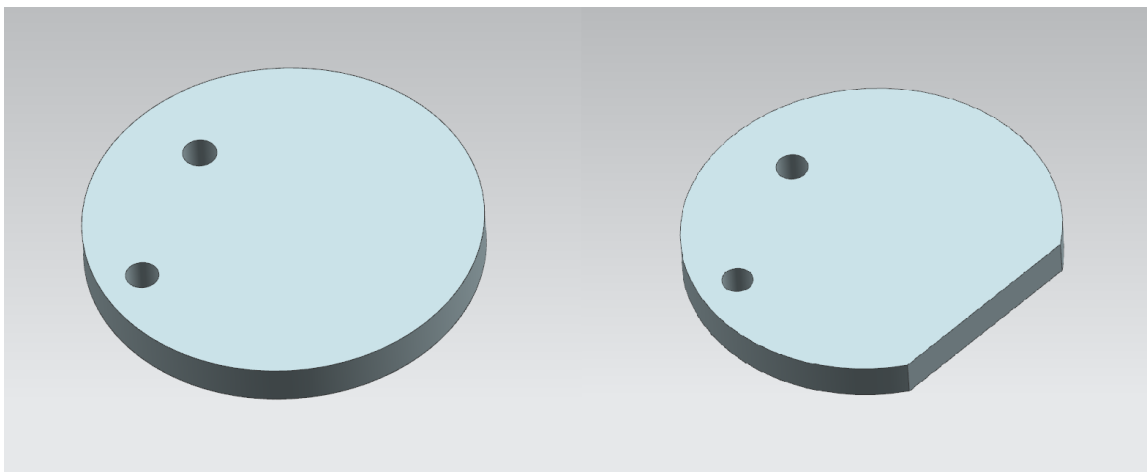
1. Suunnittele osia, jotka ovat symmetrisiä päistään sekä pyörähdyssymmetrisiä kiinnitysakselin suhteen. Jos tämä ei ole mahdollista, yritä saada osaan mahdollisimman paljon symmetrisyyttä. (Kuva 2)
2. Jos osasta ei voida tehdä symmetristä, tee siitä selvästi epäsymmetrinen (Kuva 3).
3. Suunnittele piirteitä, jotka ehkäisevät osien jumiutumista toisiinsa säilytyksen aikana.
4. Vältä piirteitä, jotka mahdollistavat osien sotkeutumisen toisiinsa säilytyksessä.
5. Vältä osia, jotka liimautuvat toisiinsa tai ovat liukkaita, hauraita, joustavia, todella pieniä tai todella isoja, tai osia, jotka voivat vahingoittaa niiden käsittelijää.

Kuvassa 2 esitetty kappale olisi vaikea orientoida automaattisesti. Siksi siitä kannattaisi tehdä myös päistään symmetrinen, vaikkei molempia uria tarvittaisikaan kokoonpanon kannalta. Kuvan 3 vasemmanpuoleinen laippa on vaikea orientoida sisällä olevien

reikien suhteen oikeaan kohtaan. Siihen kannattaisi tehdä pieni leikkaus tai jokin muu piirre, joka selvästi rikkoo ulkomuotojen symmetrisyyden.



Kuva 2: Symmetriset kappaleet



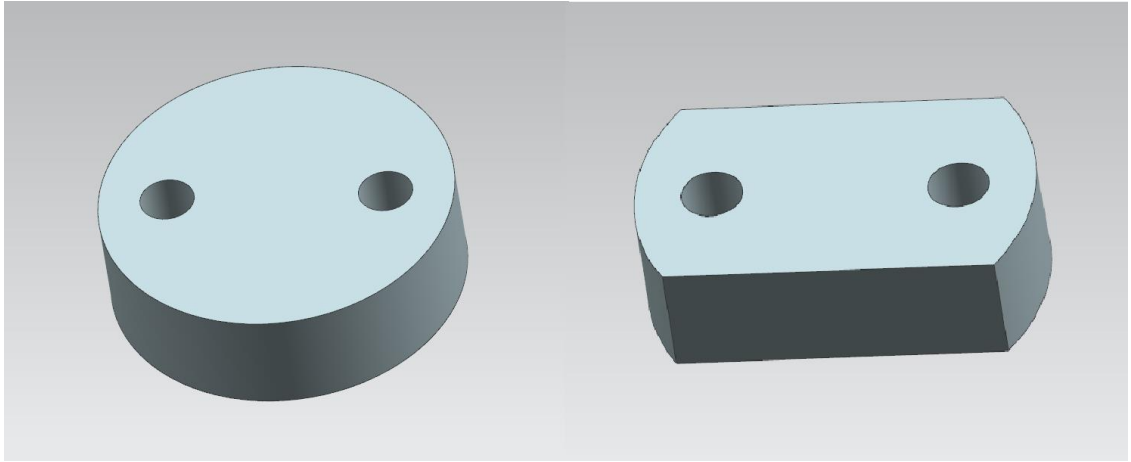
Kuva 3: Epäsymmetrisyyden liioittelu

Mikäli tuotetta tarvitsee testata kokoonpanon jälkeen, on otettava huomioon, että testipisteet eivät voi olla tuotteen sisällä, jonka lisäksi niiden tulisi olla samalla sivulla tuotetta sen kääntelytarpeen poistamiseksi. (Metalliteollisuuden keskusliitto 1988, s. 14)

2.3.5 Orientoitavuus

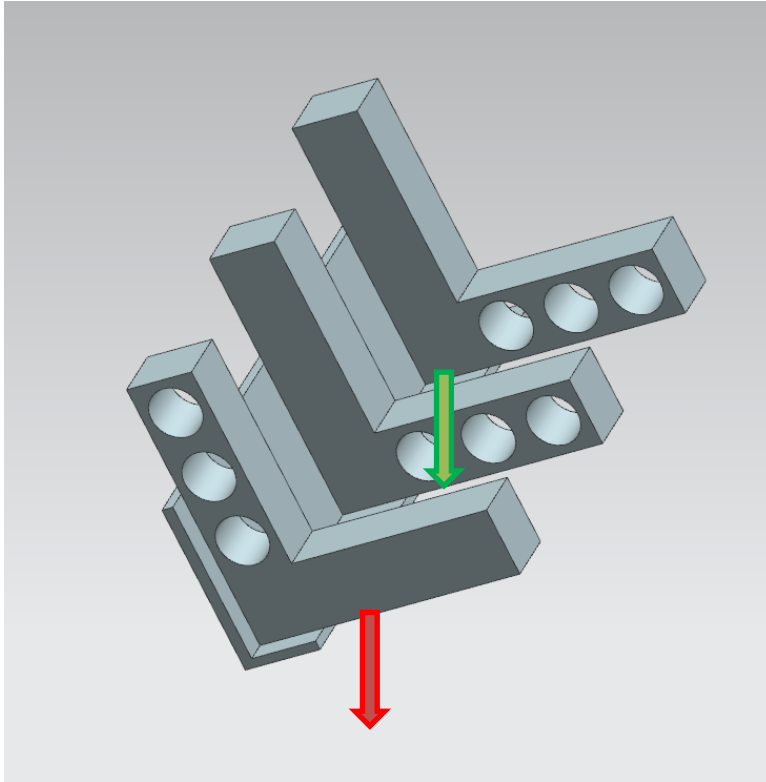
Orientoitavuudella tarkoitetaan sitä, miten helppo osa on kääntää satunnaisesta asennosta tarvittavaan asentoon. Automaattisen syötön helpottamiseksi on välttämätöntä suunnitella osien ulkopinnoille piirteitä, jonka suhteen osan orientaatio on yksiselitteinen. Tämä onnistuu suunnittelemalla täysin symmetrisiä osia, tai selvästi epäsymmetrisiä osia. Jos osan sisäpinnalla on jokin orientointia vaativa piirre, sen syöttäminen vaikeutuu huomattavasti. Tällaisissa tapauksissa ulkopintaan on tehtävä lisäpiirre. (Lempiäinen & Savolainen 2004, s. 130–132)

Kuvassa 4 nähdään pyöreä osa, jonka sisäpinnalla olevat reiät tulisi olla syöttölaitteella oikeassa asennossa. Tällaisen osan orientointi on vaikeaa. Jos taas osasta tehdään tasainen molemmilta puolilta, se voidaan ohjata syöttölaitteella oikeassa asennossa laitettavaksi kokoonpanoon. Jos pyöreys täytyy säilyttää, toinen mahdollisuus olisi tehdä yläpinnalle jokin ohjaava piirre, kuten ura tai ohjaustappi.



Kuva 4: Orientoitavuutta helpottava piirre

Orientointipiirteitä voivat olla esimerkiksi urat, viisteet tai pykälät. Joissain tapauksissa myös osan painopistettä voidaan käyttää hyväksi sen orientoinnissa (kuva 5). Kuvan alimman osan painopiste on kourun tukipinnan ulkopuolella ja osa tippuu kourusta pois takaisin syöttölaitteiston alkupäähän. Ainoastaan jos osa on oikeinpäin kuten 2 taaempaa, ne jatkavat matkaansa kokoonpanolaitteistossa. Putoava osa kulkeutuu uudestaan esimerkiksi tärymaljan kautta niin monta kertaa, että se tulee oikeinpäin kouruun. Nykyaikaisissa kokoonpanojärjestelmissä myös konenäköä voidaan käyttää tunnistamaan osan orientaatio (Boothroyd et al. 2010, s. 188).



Kuva 5: Painopisteen käyttö orientoinnissa (muokattu lähteestä *Metalliteollisuuden keskusliitto 1988, s. 23*)

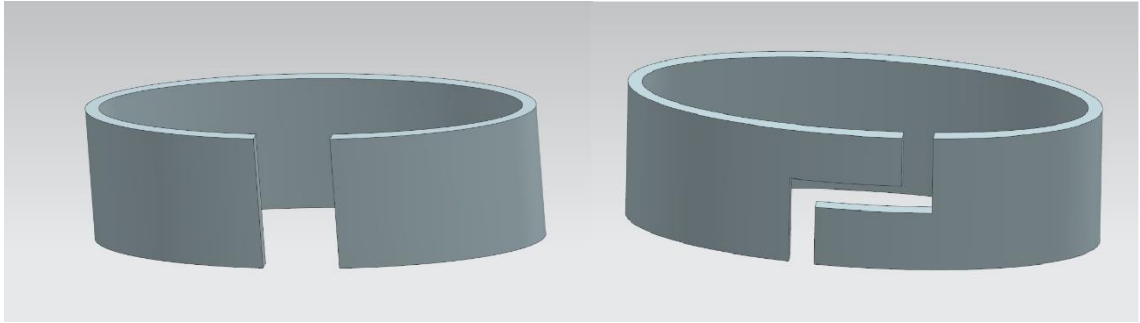
2.3.6 Syöttäminen

Automaattisessa kokoonpanossa osien syöttö (engl. feeding) on hyvin keskeinen tekijä automatisoinnin onnistumisen kannalta. Syöttölaite voi olla esimerkiksi hihnakuuljetin, putki, ränni tai nauha. Syöttölaitteelta osia on oltava mahdollista syöttää koneelle yksinkertaisia tarttuvia käyttäen oikeassa asennossa. Syöttövaiheessa osan tulee pysyä tukevasti oikeassa asennossa. Syöttölaite ei saa tukkeutua esimerkiksi osien kiivetessä toistensa päälle. (Boothroyd et al. 2010, s. 186)

Syöttölaitteet voivat jättää jälkiä osan pintaan erityisesti muoviosissa. Tämä täytyy ottaa huomioon materiaalivalintoja tehdessä. Jos osia syötetään erillisiä tarjottimia tai paletteja hyväksikäyttäen, osien täytyy olla mahdollisimman vähän tilaa vieviä.

Osien sotkeutuminen toisiinsa varastoinnin tai syötön aikana on suuri ongelma kokoonpanotyössä. Jos osia joudutaan erottelamaan, se on turhaa työtä ja se voi estää automaattisen kokoonpanon käyttämisen kokonaan. Osat sotkeutuvat toisiinsa, jos niissä on ulokkeita, jotka ovat pienempiä kuin osassa olevat reiät, tai jos niiden muoto mahdollistaa sotkeutumisen. Näitä täytyy osata välttää suunnittelussa. Kuvassa 6 on esimerkki tällaisen osan huonosta ja hyvästä suunnittelusta. Vasemmanpuoleinen osa mahdollistaa osien sotkeutumisen ja niiden automaattinen erottelu vaikeutuu. Oikeanpuoleisessa

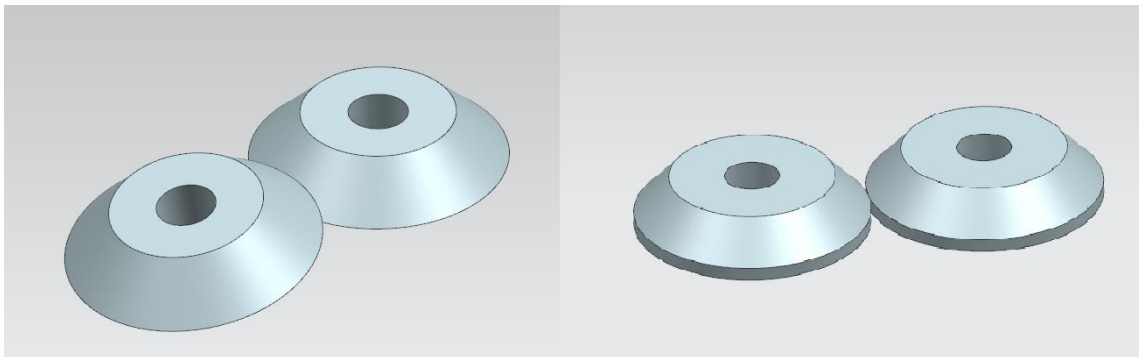
ei ole mahdollista, että osat sotkeutuvat sisäkkäin, mutta osa säilyttää täyden toiminnallisuuden. (Boothroyd et al. 2010, s. 203)



Kuva 6: Toisiinsa sotkeutuvat osat (muokattu lähteestä Boothroyd et al. 2010, s. 204)

Jos osia syötetään pinosta, täytyy ottaa huomioon osien mahdollinen holvaantuminen toisiinsa. Tämä on tärkeä asia esimerkiksi osittain kartion muotoisissa kappaleissa. Pinosta syötettävien osien täytyy myös kestää päällekkäin olevien osien paino. (Lempiäinen & Savolainen 2004, s. 135–136)

Jos osien syöttämiseen käytetään hihnakuljetinta, ne eivät saa nousta jonon paineen tai täryttämisen ansiosta toistensa päälle, jolloin syöttölaite tukkeutuu. Tämän estämiseksi kannattaa suosia kohtisuoria pintoja viistojen tai pyöreiden muotojen sijaan (Kuva 7). Kohtisuorien pintojen valmistus edesauttaa myös osaan tarttumisessa, koska siihen voidaan käyttää enemmän voimaa. Myös osan pohjapinnan tulee olla mahdollisimman tasainen. Myös kappaleen painopisteen sijoittaminen niin alas kuin mahdollista auttaa osia kulkemaan siististi linjalla. (Lempiäinen & Savolainen 2004, s. 129)



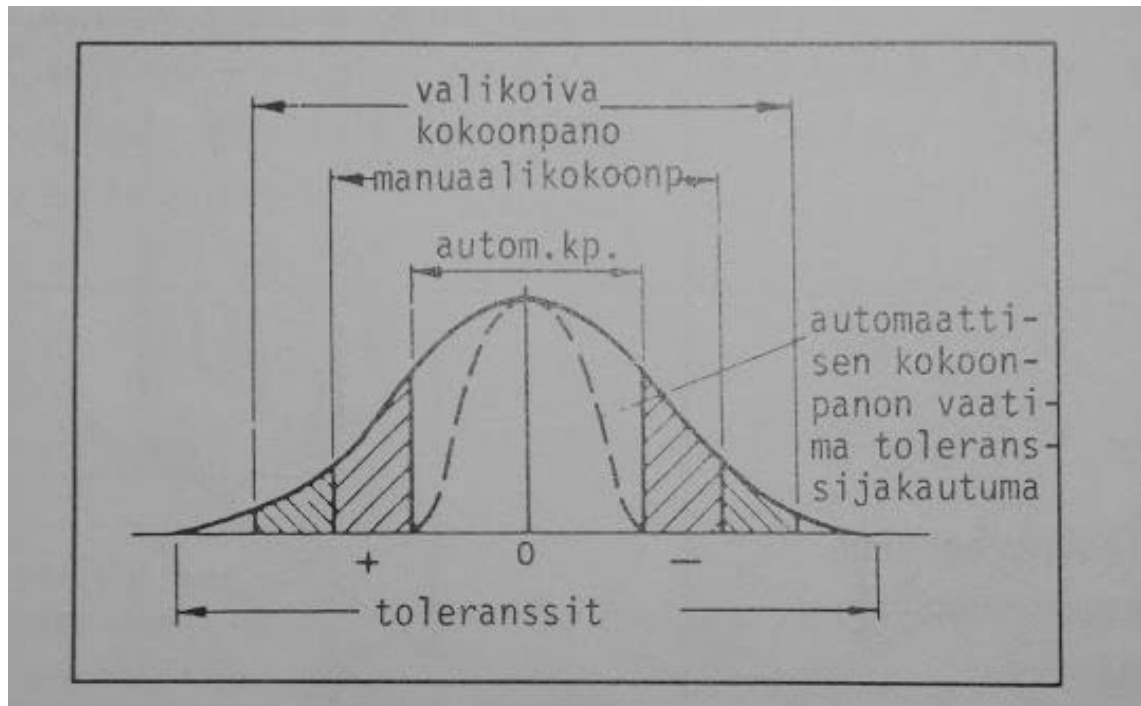
Kuva 7: Osien pinoutuminen jonon paineen ansiosta

2.3.7 Toleranssit

Manuaalisessa kokoonpanossa työntekijä voi helposti kokeilla toista osaa heti perään jos ensimmäinen ei ole sopiva, joten laatuvaatimukset asennustoleranssin suhteen voivat olla tiukat. Asennustoleranssilla tarkoitetaan esimerkiksi tapin ja reiän väliin jäävää tilaa (Eskilander 2001, s. 181).

Koska automaattisessa kokoonpanossa ei pystytä sovittamaan osia toisiinsa, täytyy välttää tiukkojen asennustoleranssien käyttöä. Eskilanderin (2001) automaattisen kokoonpanon DFA-menetelmässä pienemmät kuin 0,1 millimetrin asennustoleranssit arvostellaan huonoimmaksi, ja yli 0,5 millimetrin toleranssit hyväiksi. Pieniä toleransseja tulisi välttää kaikkialla missä mahdollista, sillä ne johtavat suurempiin valmistuskustannuksiin (Andreasen & Ahm 1986, Eskilander 2001, s. 181 mukaan). Mikäli osan asennus tarvitsee merkittävästi voimaa, sen asennuskustannus nousee noin 50 prosenttia (Boothroyd & Dewhurst 1983, Metalliteollisuuden keskusliitto 1988 mukaan). Osiin täytyy suunnitella hyvät ohjaukset esimerkiksi viisteyttämällä niiden reunat. Viisteet tulisi olla sekä asennettavassa osassa että runko-osassa (Eskilander 2001, s. 179, Boothroyd et al. 2010, s. 90).

Toisin kuin asennustoleranssit, osien valmistustoleranssit tulee olla tiukat varsinkin automaattisessa kokoonpanossa (kuva 8). Valmistustoleranssilla tarkoitetaan osan samantyyppisyyttä muiden samojen osien kanssa, esimerkiksi akselin halkaisijan vaihtelua. Automaattisessa kokoonpanossa käytettävistä osista korkeintaan 2 % saa olla viallisia (Boothroyd 1983, Metalliteollisuuden keskusliitto 1988 s. 5 mukaan).



Kuva 8: Valmistustoleranssit eri kokoonpanoissa (Metalliteollisuuden keskusliitto 1988, s. 16)

2.3.8 Modulaarisuus

Pahl et al. (2007, s. 495) määrittelevät modulaariset tuotteet siten, että ne ovat koneita, kokoonpanoja ja komponentteja, jotka suorittavat useita funktioita erillisten, funktionaalisten yksiköiden, moduulien yhdistelmänä. Simpson et al. (2006) määritelmän mukaan moduuli on komponentti tai alikokoonpano, joka pystytään vaihtamaan tuotteen sisällä muodostettaessa monipuolinen tarjonta samankaltaisia tuotteita. Boothroyd et al. (2010, s. 201) mukaan automaattisen kokoonpanon tuote kannattaa jakaa moduuleihin jos koko tuotteen kokoonpano suoraan ylhäältä ei ole mahdollista.

Tuotteen modulointi eli kokoonpanon jakaminen useampaan pienempään osakokoonpanoon mahdollistaa tuotteen räätälöinnin asiakaskohtaisiin tarpeisiin. Jos asiakas A ei halua tuotteeseen osia B ja C, ne voidaan jättää tuotteesta pois ilman minkäänlaisia muutoksia tuotteen muuhun konstruktion. (Kivi 1992, s. 18)

Moduloinnin avulla voidaan helposti luoda erilaisia tuoteperheitä ja tuotekokoja. Modulaarisuus myös mahdollistaa tuotteen nopean läpäisyn loppukokoonpanossa mahdollistaen lyhyet toimitusajat. (Emmatty & Sarmah 2012, s. 697)

Eri moduulien väliset rajapinnat ovat kriittisiä tuotteen suunnittelussa ja valmistusprosessissa. Favi & Germani (2012, s. 159) listaavat 5 mahdollisuutta rajapinnan toteutukselle: mekaaninen, jossa on liikkeen siirtoa moduulista toiseen, mekaaninen liikkumaton kiinnitys, sähköinen, optinen sekä magneettinen rajapinta.

Kiven (1992, s. 18) mukaan moduloinnin tavoitteena on saavuttaa mahdollisimman pienellä moduulimäärällä erilaisia tuotteita mahdollisimman suurelle asiakasmäärälle. Usein moduulirakenteinen tuote on hieman monimutkaisempi rakenteeltaan, mutta sillä saavutettavat hyödyt kumoavat monimutkaisuuden haitat (Kauppinen 1983, s. 18). Hyötyinä Kauppinen (1983, s. 18) mainitsee sopivan kokojen porrastuksen, helpon muunneltavuuden ja osaperheiden muodostumisen.

Hyvä esimerkki modulaarisesta tuotteesta on auto. Asiakas pystyy valitsemaan lisävarusteita, kuten peruutuskameran tai kaistavahdin, mielivaltaisesti ja auto kokoonpannaan yksilöllisesti samalla linjalla muiden kanssa.

2.4 DFA-menetelmät

2.4.1 Boothroyd & Dewhurst DFMA

Professorit Geoffrey Boothroyd ja Peter Dewhurst ovat kehittäneet oman menetelmänsä (DFMA, Design for Manufacture and Assembly) kokoonpanon helppouden arvoimiseksi. Menetelmässä pisteytetään jokainen osa erikseen eri kriteerit huomioon ottaen, ja tulokseksi saadaan numeerinen arvo kokoonpantavuuden helppoudelle luokittelemalla osien käsittelyyn ja liittämiseen tarvittava aika. Luokittelussa otetaan huomioon osan symmetrisyys, paksuus ja koko, paino, molempien käsien tarve, jumiutuminen tai sotkeutuminen toisiin osiin, viisteytys, rajoitettu näkyvyys, esteettömyys sekä tarve pitää osaa paikallaan seuraavaa osaa kiinnitettäessä. Näistä tekijöistä on monipuolisten koekoiden pohjalta luotu pisteytystaulukot sekä osan käsittelylle että paikalleen asettamiselle ja kiinnittämiselle (Boothroyd et al. 2010, s.83–84). Favi & Germani (2012) mainitsevat Boothroydin ja Dewhurstin menetelmän olevan kaikista tunnetuin ja laajimmin käytetty DFA-menetelmä.

Menetelmän tulos saadaan laskemalla DFA-indeksi E_{ma} , joka mittaa kokoonpanon tehokkuutta. Kokoonpanon kustannuksiin vaikuttaa 2 päätekijää, osien lukumäärä ja osien käsittelyn, asettamisen ja kiinnittämisen helppous. Indeksia voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$E_{ma} = \frac{N_{min} t_a}{t_{ma}} \quad (1)$$

Kaavassa N_{min} on teoreettinen osien minimimäärä, t_a on keskimäärin osan, jonka käsittelyssä ja liittämiseksi ei ole vaikeuksia, kokoonpanemiseen kuluva aika (n. 3 s) ja t_{ma} on arvoitu koko tuotteen kokoonpanoon kuluva aika. Teoreettisen osien minimimäärän laskemiseen käytetään kriteerejä, jotka lueteltiin kappaleessa 2.3.1. Mitä suurempi tulos indeksille saadaan, sen tehokkaampi kokoonpano on. Tuloksen perusteella suunnittelija voi miettiä millä keinoin tuotetta voisi yksinkertaistaa paremman kokoonpantavuuden saavuttamiseksi. Usein paremman kokoonpantavuuden saamiseksi täytyy eliminoida turhia osia, ja tekemällä niistä nopeammin kokoonpantavia. (Boothroyd et al. 2010, s.82)

Menetelmällä voidaan myös arvioida automaattisen kokoonpanon tuotteita. Tällöin kaavaan 1 sijoitetaan osien käsittelyyn kuluvan ajan sijasta niiden käsittelykustannukset.

Metodin haittapuoli on se, että se keskittyy enemmän manuaalisen kokoonpanon tuotteisiin. Metodi ei myöskään anna ohjeita tuotteen uudelleensuunnittelulle jos analyysi antaa huonon tuloksen. (Eskilander 2001, s. 53)

Favi & Germani (2012, s. 157) sanovat metodin haittapuoleksi sen, että sitä voidaan hyödyntää vain valmiiksi suunniteltuun tuotteeseen, koska laskentaindeksit pohjautuvat tarkkaan osien määrään ja niiden kokoonpanoliikkeisiin. Siksi konseptointivaiheessa tulisi käyttää jotain toista metodia.

2.4.2 Hitachi AEM

Hitachi Assembly Evaluation Method on japanilaisen teknologiayrityksen Hitachin 1970-luvulla kehittämä DFA-suunnittelumetodi. Metodien tavoitteena oli tuottaa suunnittelijalle palautetta kokoonpanon helppoudesta jo suunnittelun alkumetreillä. (Leaney & Wittenberg 1992)

Hitachin metodin perusta on ”yksi liike per yksi osa”. Kaikki kokoonpanotoimenpiteet pisteytetään kokoonpantavuuden mukaan, ja kaikkien osien pisteistä muodostetaan kokoonpantavuusindeksi. Metodien arviointi sisältää noin 20 erilaista kokoonpano-operaatiota. Ideaali kokoonpanosuunta on suoraan ylhäältä alaspäin, josta annetaan 100 pistettä osalle. Osa voi saada vähemmän pisteitä riippuen kokoonpano-operaation vaikeudesta, hitaudesta sekä kustannuksista. Kun kaikki osat on arvioitu, lasketaan niiden pisteet yhteen ja jaetaan osien määrällä. Tuotteen arvosana 100 tarkoittaa sitä, että jokainen osa kootaan suoraan ylhäältä alaspäin. Hyvä tavoitearvosana on 80, jonka saava tuote on Hitachin mukaan mahdollista automatisoida järkevällä hinnalla. (Miyakawa & Ohashi 1986, Eskilander 2001, s. 48 mukaan)

Myös kustannussuhde uuden designin ja alkuperäisen designin välillä lasketaan. Tässä tavoitearvosana on 0.7, joka tarkoittaa 30 % säästöjä kokoonpanokustannuksissa alkuperäiseen verrattuna. (Egan 1997, Eskilander 2001 s.48 mukaan)

Tämän metodin heikkous on se, että se keskittyy pääosin ainoastaan osan sovitus- ja kiinnitysvaiheisiin. Keskittymällä vain osaan kokoonpanoprosessista riskeerataan tuotteen designin liian alhainen optimointi. Lisäksi metodin tulokset eivät kerro, miten tuote tulisi suunnitella sen saadessa huonot tulokset. (Eskilander 2001, s.48)

2.4.3 Lucas DFA

Lucas DFA on Hullin yliopiston kehittämä metodi. Se perustuu samaan tutkimusprojektiin Boothroydin ja Dewhurstin DFMA:n kanssa. Metodilla voidaan arvioida tuotetta sekä manuaalisen että automaattisen kokoonpanon näkökulmasta.

Tuotteen analysointi Lucasin metodilla sisältää kolme vaihetta. Joka vaiheen tuloksena saadaan yksi kokoonpantavuusindeksi, MOP (engl. "measures of performance"). Analyysi perustuu kokoonpanojärjestysvuokaavioon, ASF (engl. "assembly sequence flowchart")

Ensimmäisessä vaiheessa suoritetaan toiminnallisuusanalyysi. Osat, jotka suorittavat ensisijaisia funktioita luokitellaan kirjaimella A. Osat, jonka tarkoitus on suorittaa toissijaisia funktioita, kuten kiinnitysosat, luokitellaan kirjaimella B. Näiden jälkeen lasketaan tuotteen designin tehokkuus seuraavalla kaavalla. (Eskilander 2001, s. 54)

$$\text{MOP}_{\text{Design Efficiency}} = \frac{A}{A + B} \quad (2)$$

Eganin (1997) mukaan tehokkuuden tavoitearvo on 60% (katso Eskilander 2001, s. 54).

Toinen vaihe on syöttöanalyysi. Vaiheen suoritus eroaa riippuen siitä, kumpi kokoonpanotapa on käytössä. Manuaalikokoonpanolle lasketaan suhteellinen käsittelykustannus joka osalle. Automaattiselle kokoonpanolle syöttöanalyysi ohjaa suunnittelijaa sopivaan osien syöttötapaan. (Eskilander 2001, s. 54) Syöttöindeksin huippuarvo on 1, ja sitä suuremmilla arvoilla osan syöttö on vaikeaa esimerkiksi sotkeutumisen tai orientoinnin takia (Leaney & Wittenberg 1992). Syöttöindeksin tarkempaan laskemiseen on taulukko (Mital et al. 2008, s. 144), johon ei syvennyttä tässä työssä.

$$\text{MOP}_{\text{feeding ratio}} = \frac{\text{syöttöindeksi}}{\text{välttämättömien A – osien lukumäärä}} \quad (3)$$

Eganin (1997) mukaan tälle tulokselle tavoitearvo on 2,5 tai vähemmän (katso Eskilander 2001, s. 54).

Kolmas vaihe on sovitusanalyysi. Se määrittää suhteellisen kustannuksen jokaisen osan sovitukselle. Automaattiselle kokoonpanolle tehdään ylimääräinen tarttumisanalyysi, joka määrittää sen siirtämisen helppouden syöttölaitteelta sovituspaikkaan. Sovitusanalyysin tekemiseksi koko kokoonpanojärjestys on oltava tiedossa. (Eskilander 2001, s.54) Sovitusindeksin määrittämiseksi otetaan huomioon osan asentaminen, kiinnittäminen, mahdollinen kiinnittämisen tarve, mahdollinen säätämisen tarve sekä osasta tarttuminen (Leaney & Wittenberg 1992). Sovitusindeksin tarkempaan laskemiseen on taulukko (Mital et al. 2008, s. 145), johon ei syvennyttä tässä työssä.

$$\text{MOP}_{\text{fitting ratio}} = \frac{\text{sovitusindeksi}}{\text{välttämättömien A – osien lukumäärä}} \quad (4)$$

Tälle tulokselle tavoitearvo on myös 2,5 tai vähemmän (Egan 1997, Eskilander 2001 s. 54 mukaan).

Tuotteen parantamiseksi suunnittelijan täytyy poistaa tuotteesta kaikki B-osat tai yhdistää ne A-osiin. Tämän metodin haittapuoli on se, että se ei ole tarpeeksi yksityiskohtainen joissain tapauksissa. Metodi ei myöskään anna palautetta siitä, miten tuote tulisi suunnitella uudestaan jos se saa huonon tuloksen. (Eskilander 2001, s. 55)

2.4.4 DFA2

DFA2 on edellä mainittuja metodeja uudempi, ruotsalaisen Stefan Eskilanderin väitöskirjassaan (2001) kehittämä metodi. Tuotteen suunnittelun alkuvaiheessa se antaa käyttäjälleen palautetta siitä, miten tuotetta tulisi parantaa, toisin kuin monet menetelmät, jotka kertovat ainoastaan onko tuote huono tai epäsoveltuva kokoonpanoprosessiin. Metodi perustuu esitutkimukseen, jossa suunnittelijoilta kysyttiin, millaisia piirteitä he haluaisivat uudessa DFA-menetelmässä olevan. Valitut piirteet ovat tiimien välinen yhteys, tiedon siirto, kustannusanalyysi, laatuvarmuus, geometrinen tuoteanalyysi, suunnitteluohjeet, ohjelmistopohjaisuus, tarpeettomien tekijöiden sivuuttaminen sekä käyttäjäturvallisuus. Metodi keskittyy pelkästään automaattisen kokoonpanon tuotteisiin. (Eskilander 2001, s.70)

Metodin arviointia varten on laadittu arviointikriteerit (kuva 9) tuotteelle kahdessa osassa, ensin tuotetasolla ja sitten osatasolla. Tuotetason arviointi kohdistuu koko tuotteeseen tai yhteen sen moduuliin. Osatason arviointi kohdistuu moduulien yksittäisiin osiin.

Jokaiselle osalle annetaan pisteitä 1,3 tai 9 riippuen siitä, kuinka hyvä osa on automaattisen kokoonpanon näkökulmasta. Ideaalisen tuotteen jokainen osa saa 9 pistettä jokaisessa kategoriassa. Pisteiden avulla saadaan laskettua DFA2-indeksi kaavalla 5 (Eskilander 2001, s. 78).

$$\text{DFA2-indeksi (\%)} = 100 * \frac{\text{yhteistulos arvioidulle tuotteelle}}{\text{maksimitulos ideaalille tuotteelle}} \quad (5)$$

Indeksi antaa hyvän kokonaiskuvan tuotteen sopivuudesta automaattiselle kokoonpanolle, mutta sen kanssa suositellaan käytettävän myös erillistä kustannusanalyysiä. Lisäksi arviointikriteereissä suositellaan käytettävän erisuuruisia painotuksia jos taloudelliset laskelmat otetaan huomioon. (Eskilander 2001, s.81)

Metodi ei tarvitse valmista tuotetta tai sen prototyyppiä arvion tekemiseen, vaan sitä voidaan käyttää jo konseptointivaiheessa.

Tuotetaso (arviointikriteerit tuotteelle tai moduulille)	Osataso (arviointikriteerit kokoonpanoprosessille)
<ul style="list-style-type: none"> • Osien määrän vähentäminen • Uniikit osat • Runko-osa • Kokoonpanosuunnat • Yhtäaikaiset toimenpiteet • Toleranssiketjut • Tuotteen purkaminen • Pakkaaminen 	<ul style="list-style-type: none"> • Osan kokoonpanotarve • Vikojen määrä • Orientaatio • Ei-hauraat osat • Takertuminen toisiin osiin • Painopiste • Massa • Osan koko • Tartuntapinnat • Kokoonpanoliikkeet • Saavutettavuus (esim. puutteellinen näkymä) • Sovittaminen • Toleranssit • Tarve pitää osia kiinni • Kiinnitysmenetelmä • Liittäminen • Tarkistaminen/säätäminen

Kuva 9: DFA2-metodin arviointirakenne (muokattu lähteestä Eskilander 2001, s. 79)

3. KOKOONPANOJÄRJESTELMÄT

Kokoonpanojärjestelmiä on monia erilaisia. Tässä luvussa käsitellään niistä yleisimpiä ja selvitetään miten manuaalisen ja automaattisen kokoonpanon järjestelmät eroavat toisistaan.

3.1 Manuaalinen kokoonpano

Manuaalisella kokoonpanolla tarkoitetaan kokoonpanoa, jonka suorittaa ihminen. Kokoonpanija kokoaa tuotteen osista ja tarvikkeista käsin tai käsityökaluja apuna käyttäen ohjeiden tai piirustusten mukaisesti. Kokoonpanija siirtelee osia käsin tai käyttäen isojen osien siirtelyyn tarkoitettuja nostimia. Tyypillisesti työ suoritetaan erillisessä kokoonpanosolussa, johon osat tuodaan valmiiksi varastosta joko keräilyosaston tai itse työntekijän toimesta yksitellen tai esimerkiksi osien keräilyyn tarkoitetuilla kärryillä. Valmiin tuotteen toiminta tarkastetaan ja tarvittaessa siihen tehdään säätöjä. (Swift & Booker 2013, s. 281)

Tyypillisimmät manuaalikokoonpanon käyttökohteet ovat elektroniikkatuotteet, autojen kokoonpanolinjat, lelut, huonekalut, kodinkoneet sekä vaate- ja kenkäteollisuus. (Swift & Booker 2013, s. 282) Swift & Booker myös mainitsevat suurimmiksi manuaalikokoonpanon hyödyiksi erittäin hyvän joustavuuden, pienet laitekustannukset sekä nopean perustamisajan. Haittoja puolestaan ovat suuret työvoimakustannukset.

Parhaiten yksittäis- ja pienerätuotantoon sopiva kokoonpanojärjestelmä on kokoonpanopaikka. Tuotteen koon mukaan siinä työn hoitaa yksittäinen työntekijä tai pieni ryhmä. Kokoonpano voi olla jaoteltuna erikoistumisaloittain, kuten mekaaninen kokoonpano, sähkökokoonpano sekä hydraulikkakokoonpano. (Lapinleimu et al. 1997, s.112)

Parhaiten suurten erien valmistukseen sopii kokoonpanolinja. Mitä pienempiin osiin kokoonpanotyö on pilkottu, sitä lähemmäksi voidaan mennä koko ajan liikkuvaa liukuhihnatyötä. Linja voi olla järjestetty siten, että yksi työryhmä tekee yhtä vaihetta koko ajan ja tuote liikkuu linjalla eteenpäin, tai siten, että yksi ryhmä liikkuu tuotteen mukana linjan alusta loppuun. Tuotteen ollessa linjan lopussa se tarkastetaan ja lähetetään eteenpäin, ja ryhmä palaa linjan alkuun aloittamaan seuraavaa tuotetta. (Lapinleimu et al. 1997, s. 112)

Suurille tuotteille ja tuotantomäärille soveltuu kokoonpanotehdas. Siihen sisältyy useita osakokoonpanopaikkoja ja kokoonpanolinjoja, sekä loppukokoonpanolinja, jossa kaikki aiemmat vaiheet liitetään yhteen lopulliseksi tuotteeksi. (Lapinleimu et al. 1997, s. 112)

3.2 Automaattinen kokoonpano

Automaattisella kokoonpanolla tarkoitetaan kokoonpanoa, jonka suorittaa koneet. Osat tuodaan paikalle automaattisesti hihnakuljettimia tai muita osien siirtelyvälineitä hyväksikäyttäen. Ihmisellä on vain tarkkailijan rooli. Automaattisessa kokoonpantavuudessa hyvällä kokoonpantavuudella ei tarkoiteta vain sitä, miten hyvin osat sopivat toisiinsa, vaan myös osien varastointia, järjestelyä, sopivuutta kuljettimille ja kokoonpanolaitteistoon (Metalliteollisuuden keskusliitto 1988).

Automaattisen kokoonpanon hankaluuksiin sekä kustannuksiin vaikuttaa eniten osien lukumäärä, joten hyvä lähtökohta suunnittelulle on sen minimointi. Tähän syitä ovat jokaisen osan varastointitarve, oikea orientointi kokoonpanoa varten, kuljetus kokoonpanoalueelle, asettaminen kokoonpanoon ja osan kiinnitys jo kokoonpantuihin osiin. (Metalliteollisuuden keskusliitto 1988, s.5)

Tyypillisesti sekä jäykän että joustavan kokoonpanoautomaation koneita tarvitaan useita, jotka asetellaan kokoonpanolinjaksi peräkkäin. Koneiden välillä kulkee linja, joka liikkuu jatkuvasti tai tietyssä tahdissa eteenpäin. Eripituisten operaatioiden takia puskurivarastoja voi joutua käyttämään. (Swift & Booker 2013, s. 288)

3.2.1 Jäykkä kokoonpanoautomaatio

Jäykässä kokoonpanoautomaatiossa tuote kootaan juuri tietylle tuotteelle valmistetuilla kokoonpanokoneilla. Koneiden muunneltavuus toiselle tuotteelle on vaikeaa. Tämänkaltaisen järjestelmä sopii erittäin suurille valmistusmäärille, sillä koneinvestoinnit ovat kalliita. (Lapinleimu et al. 1997, s. 117; Mital et al. 2008, s. 136)

Swift & Booker (2013, s. 288) toteaa jäykän automaation hyödyksi erittäin suuren valmistuskapasiteetin ja haittoiksi suuret investoinnit, joustamattomuuden sekä pitkän kehitysajan. Tyypillisiä käyttökohteita jäykälle automaatiolle on elektroniikkatuotteet, piirilevyt, pienet kodinkoneet, autoteollisuuden osakokoonpanot sekä toimistotarvikkeet.

3.2.2 Joustavat automaattiset kokoonpanojärjestelmät

Joustavat automaattiset kokoonpanojärjestelmät (engl. Flexible Assembly System, FAS), ovat yleisiä ihmisille vaarallisissa ympäristöissä, koneistuskeskuksissa, hitsauskokoonpanoissa sekä viimeistelyoperaatioissa (Swift & Booker 2013 s. 285). Koko laitteisto on muunneltavissa erilaisiin tuotteisiin, yleensä saman tuoteperheen sisällä.

Järjestelmää on mahdollista käyttää myös pieniin eräkokoihin, jopa yksittäisiin tuotteisiin. (Lapinleimu et al. 1997, s. 118–119)

Joustava järjestelmä voi sisältää erityylisiä ohjelmitavia robotteja, siirtomekanismeja, syöttölaitteita sekä tarttuvia. Tarttijat voivat olla pneumaattisia, imuohjauksella toimivia, sähkömagneetilla toimivia tai sähkömekaanisia. (Swift & Booker 2013, s. 284)

Swiftin ja Bookerin (2013, s. 285) mukaan joustavan järjestelmän suurimpia hyötyjä ovat ekonomisuus suurelle valmistusmäärälle, pienet työvoimakustannukset sekä muunneltavuus tuotteiden välillä. Haittoja sen sijaan ovat pitkä kehitysaika sekä todella suuret laitekustannukset. Mital et al. (2008, s. 137) mukaan joustavuus kuitenkin auttaa jakamaan hankintakustannuksia useammalle tuotteelle.

Tässä luvussa esitellyt kokoonpanojärjestelmät eivät kuitenkaan ole ainoita mahdollisuuksia. Usein näistä muodostetaan jonkinlainen sekoitus, jolloin esimerkiksi kokoonpano hoidetaan koneilla automaattisesti ja ihminen on valvojan ja tarkistajan roolissa.

4. DFA:N VERTAILU ERI KOKOONPANO-TAVOILLA

DFA:n käytössä erittäin hyvänä lähtökohtana on osien määrän pienentäminen, johon tulisi pyrkiä molempia kokoonpanotapoja käytettäessä. Osien määrä on suurin yksittäinen kokoonpanoa hankaloittava tekijä. Tätä ei kannata aliarvioida, mutta ei myöskään liioitella, kuten Fernandezin (1993) artikkelissa esitettiin. Kiinnitystavat ovat yksi suurimmista vaikuttajista tuotteen osien määrään, joten jos ruuvikiinnityksiä saadaan muutettua napsausliitoksiin, se tulee vaikuttamaan positiivisesti kokoonpantavuuteen sekä kustannuksiin. Etenkin automaattisessa kokoonpanossa ruuvien, aluslevyjen ja mutterien käsittely voi olla myös erittäin hankalaa.

Osien käsiteltävyys on myös tärkeää molemmille kokoonpanotavoille kokoonpanon sujumisen edistämiseksi. Kaikki turhat toimenpiteet osan kääntämiseksi oikeaan asentoon voidaan estää tekemällä osasta symmetrinen, ja lian poisto jo valmistusvaiheessa ja sen kerääntymisen estäminen varastossa ovat elintärkeitä tekijöitä kokoonpanoajoissa sekä -kustannuksissa. Automaattisen kokoonpanon osissa täytyy kiinnittää huomiota siihen, miten osaan on tarkoitus tarttua. Jos osaa tarvitsee kuumentaa sen asentamiseksi, se vaikeuttaa manuaalikokoonpanoa enemmän kuin robottia. Joustavat osat taas vaikeuttavat robottia enemmän kuin ihmistä.

Osien sotkeutuminen toisiinsa vaikeuttaa automaattista kokoonpanoprosessia huomattavasti, kun taas ihminen pystyy erottelemaan osia melkein ilman viivästyksiä. Robotti ei välttämättä tajua, että sen tarttumaan osaan on takertunut toinenkin osa, ja sen yrittäessä asentaa osaa tuote voi vioittua ja kokoonpanolaitteisto jumiutua.

Orientoitavuus on lähinnä automaattisen kokoonpanojärjestelmän ongelma. Mikäli orientaatio on helposti nähtävissä, ihminen näkee heti miten päin osa on ja pystyy sen asettamaan paikalleen ilman suuria vaikeuksia. Ihminen on todella joustava liikkeissään, nopeudessaan, voimankäytössään, näössään sekä arviointikyvyssään. Nämä kohdat eivät ole ollenkaan yksinkertaisia automaattiselle kokoonpanoyksikölle.

Samaa voidaan sanoa syöttömenetelmän huomioinnista suunnittelussa. Manuaalisessa kokoonpanossa ihminen yleensä keräilee osia niille tarkoitetuista laatikoista tai varastohyllyistä. Automaattiset kokoonpanolaitteistot taas vaativat suurta ajattelua osan syöttämiselle, koska osat eivät saa sotkeutua toisiinsa, tukkeuttaa syöttölaitetta, ja niistä on oltava helppo tarttua osan paikalleen asettamiseksi.

Manuaaliselle kokoonpanotavalle erityispiirre on ihmisen työergonomia. Tätä yleensä vaalitaan muokkaamalla työympäristö ja välineet hyväksi, mutta kokoonpantavan tuotteen suunnittelu vaikuttaa siihen myös. Jos kokoonpanijan täytyy kurotella tai kyyristellä turhaan suurikokoista tuotetta käsiteltäessä, suunnittelijan kannattaa ottaa tämäkin huomioon mahdollisuuksien mukaan. Koneilla tätä ongelmaa ei tule, sillä ne eivät ala valittamaan selkäkivuista tehdessään samoja liikkeitä tuhansia kertoja putkeen.

Osien toleranssivaatimukset eroavat hieman kokoonpanotapojen välillä. Manuaalisessa kokoonpanossa voidaan käyttää tiukempia asennustoleransseja, koska ihminen pystyy paremmin kokeilemaan ja vitkuttamaan osan paikalleen, tai vaihtaa sen uuteen jos osa ei ole sopiva. Samasta syystä valmistustoleranssit tulee olla tiukemmat automaattisen kokoonpanon osille, jotta vältetään kokoonpanolaitteiston jumituminen kun osa ei sovi-kaan paikalleen. (kuva 8).

Kokoonpanosuunnat ovat erityisen tärkeitä miettiä kuntoon automaattiselle kokoonpanolaitteistolle. Mitä vähemmän akseleita kokoonpanorobottiin tarvitaan, sen halvemmaksi se todennäköisesti tulee. Etenkin jäykässä kokoonpanoautomaatiassa, jonka koneet ovat usein yksiakselisia, kannattaa tavoitella ylhäältä alas-kokoonpanosuuntaa koko tuotteelle. Ihmiskädet ovat niin moniliikkeisiä, että suunnat ovat vähemmän merkityksellisiä manuaalisessa kokoonpanossa.

Taulukko 1: DFA:n osa-alueiden tärkeys eri kokoonpanotavoilla

	<i>Erityisen tärkeää manuaalisessa kokoonpanossa</i>	<i>Erityisen tärkeää automaattisessa kokoonpanossa</i>
<i>Käsiteltävyys</i>	x	x
<i>Orientoitavuus</i>		x
<i>Syöttö</i>		x
<i>Sotkeutumisen välttäminen</i>		x
<i>Työergonomia</i>	x	
<i>Kokoonpanosuunnat</i>		x
<i>Osien määrä</i>	x	x
<i>Kiinnitystavat</i>	x	x
<i>Standardisointi</i>	x	x

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tutkittiin tuotteen suunnittelua kokoonpanon näkökulmasta sen eroavaisuuksien ja yhtäläisyyksien kautta sekä automaattiselle että manuaaliselle kokoonpanolle suunnitellulle tuotteelle. Työn tutkimuskysymyksenä oli, onko perusteltua käyttää eri suunniteluohjeistusta suunnitellessa tuotetta pelkästään manuaaliseen kokoonpanoon, verrattuna automaattiseen kokoonpanoon. Alan kirjallisuuden perusteella voidaan sanoa, että suurin osa DFA-periaatteista pätee molempiin tapoihin, mutta erojakin löytyy. Erojen osalta osan syöttöön, orientoitavuuteen ja sotkeutumiseen voidaan kiinnittää selvästi vähemmän huomiota silloin, kun suunnitelmissa on pelkästään manuaalikokoonpano. Pääsyyinä tähän voidaan mainita ihmisen monipuolisuus liikkeissään, nopeudessaan, voimassaan, näössään ja arviointikyvyssään.

Tuotetta suunnitellessa ei tule päättää täysin yksiselitteisesti kumpaa kokoonpanotapaa käytetään. Tuotetta voidaan kokoonpanna sekä manuaalisesti että automaattisesti. Tässä avainasemassa on tuotteen jakaminen osakokonaisuuksiin. Jos jotkin osakokoonpanot ovat välttämättä tehokkaampia koota käsin, niitä ei tietenkään kannata pakottaa automaattisesti kokoonpantaviksi.

Automaatio tulee sitä kannattavammaksi, mitä enemmän tuotetta valmistetaan. Vaikka tuote olisi kuinka hyvin suunniteltu automaattisen kokoonpanon ehdoilla, sitä ei kannata alkaa kokoonpanemaan automaattisesti jos sitä ei myydä tarpeeksi. Automaatiokoneet ovat kalliita, ja niihin investoiminen on aina yritykseltä suuri päätös. Päätöstä tehdessä kannattaa olla selvillä tuotteen kokoonpanokuluista molemmiin tavoin, jotta oikea päätös saadaan tehtyä oikeaan aikaan.

Tietenkään kaikkia DFA:n ohjesääntöjä ei voida noudattaa kerrallaan, jolloin suunnittelijan kannattaa käyttää apunaan jotain DFA-arviointimenetelmää päättäessään kahden tai useamman vaihtoehdon välillä. Ohjesäännöt eivät myöskään ota kantaa siihen, mitkä ohjeista ovat tärkeämpiä kuin toiset, jolloin sopivan arviointimenetelmän käytön hyöty kasvaa edelleen. Suunnittelijan kannattaa perehtyä eri DFA-menetelmiin ja valita niistä sopiva omalle tuotteelleen parhaiden tulosten saavuttamiseksi.

Erilaisten DFA-menetelmien teho perustuu siihen, että niitä hyödyntäessä suunnittelijan tulee kiinnittää huomiota tuotteen toiminnan kannalta epäoleellisiin seikkoihin, kuten kokoonpanon helppouteen. Analyysejä tekemällä tuote voidaan todeta soveltumattomaksi automaattiseen kokoonpanoon jo ennen kuin yritys on kerennyt ostamaan kokoonpanolaitteistot.

LÄHTEET

Andreasen, M. M., Ahm, T. (1986). Montageteknik – Fleksibel Automatisk Montage. Jemets Arbejdsgiverforening.

Boothroyd, G. & Dewhurst, P. (1983). Design For Assembly Handbook. University of Massachusetts, Amherst.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. & Knight, W. A. (2010). Product Design for Manufacture and Assembly. CRC Press LLC

Egan, M. (1997). Design For Assembly In The Product Development Process- A Design Theory Perspective, Thesis for the degree of Licenciate of Engineering, Chalmers, Report No. 1997-11-14 1997

El-Nounu, A., Popov, A. & Ratchev, S. (2017). Redesign methodology for mechanical assembly. Research in Engineering Design, Vol. 29, no. 1, pp. 107–122

Emmatty, F. J. & Sarmah, S. P. (2012). Modular product development through platform-based design and DFMA. Journal of Engineering Design. Vol. 23, no. 9, pp. 696–714.

Eskilander, S. (2001). Design for automatic assembly. Stockholm: Industriell produktion.

Favi, C. & Germani, M. (2012). A method to optimize assemblability of industrial product in early design phase: from product architecture to assembly sequence. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). Vol. 6, no. 3, pp. 155–169.

Fernandez, L. (1993). When part count reduction goes too far. Machine Design. vol. 65, no. 24, p. 92–94.

Metalliteollisuuden keskusliitto (1988). Automaattisesti kokoonpantavan tuotteen suunnitteluvaihtoehtoja. Hki: Metalliteollisuuden kustannus.

Mital, A., Desai, A., Subramanian, A., & Mital, A. (2008). Product Development: A Structured Approach to Design and Manufacture. Elsevier Science & Technology, Oxford.

Kauppinen, V. (1983). Tuotteen suunnittelu kokoonpanoa silmälläpitäen, Metalliteollisuuden kustannus, Hki

Khan, Z. (2008). Design for assembly, Assembly Automation, vol. 28, no. 3, pp. 200–206

Kivi, M. (1992). Huippuimurin kokoonpantavuus ja automaattinen kokoonpano. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Lapinleimu, I, Kauppinen, V. & Torvinen, S. (1997). Kone- ja metallituoteteollisuuden tuotantojärjestelmät. Porvoo: WSOY.

Leaney, P. G., Wittenberg, G. (1992). Design for Assembling: The Evaluation Methods of Hitachi, Boothroyd and Lucas, Assembly Automation, vol. 12, no. 2.

Lempiäinen, J. & Savolainen, J. (2003). Hyvin suunniteltu - puoliksi valmistettu: lyhyt johdatus tuotteiden valmistettavuuteen ja kokoonpantavuuteen. Helsinki: Suomen robotiikkayhdistys.

Miyakawa, S. & Ohashi, T. (1986). The Hitachi Assemblability Method (AEM), International Conference On Product Design For Assembly

Moultrie, J. & Maier, A. M. (2014). A simplified approach to design for assembly. *Journal of Engineering Design*, vol. 25, no. 1-3, pp. 44–63.

Pahl, G. et al. (2007). *Engineering Design A Systematic Approach*. London: Springer London.

Simpson, T. W. et al. (2006). *Product platform and product family design: methods and applications*. New York: Springer.

Soh, S. L., Ong, S. K. & Nee, A. Y. C (2016). Design for assembly and disassembly for remanufacturing, *Assembly Automation*, vol. 36, no.1, pp. 12–24.

Swift, K. G. & Booker, J. D. (2013). *Manufacturing Process Selection Handbook: From design to manufacture*. Elsevier Science & Technology, pp. 281–290.