

Topias Väisänen

TUOTTEEN SUUNNITTELU KOKOON- PANTAVUUDEN NÄKÖKULMASTA

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Yliopistotutkija Eeva Järvenpää
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Väisänen Topias: Tuotteen suunnittelu kokoonpantavuuden näkökulmasta
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
Huhtikuu 2020

DFA (engl. Design For Assembly, suunnittelu kokoonpanon kannalta) tarkoittaa kokoonpanomyönteistä tuotesuunnittelua. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin, miten tuotteen kokoonpantavuutta voidaan parantaa tuotetta suunnitellessa ja miksi tuotteen kokoonpantavuuteen tulisi kiinnittää huomiota. Tarvittava teoria kokoonpantavuuden kehittämiseksi ja sen vaikutuksista hankittiin lähdemateriaalin avulla. Opinnäytetyön soveltavassa osiossa sovellettiin esitettyä teoriaa case-tuotteena toimineeseen moottoripyörän sylinterikanteen.

DFA:n keskeisimmät periaatteet ovat asennusoperaatioiden määrän vähentäminen ja niiden helpottaminen. Tällaisia muutoksia saadaan aikaan vähentämällä tuotteen osamäärää ja suunnitteleamalla osista helpommin asennettavia. Osien määrää voidaan vähentää tarkastelemalla niiden tarpeellisuutta ja muuttamalla tuotteen rakennetta. Lukuisia osia voidaan yhdistää yhdeksi osaksi hyödyntämällä erilaisia valmistusmenetelmiä ja materiaaleja. Osien asennuksesta voidaan tehdä sujuvampaa tarkastelemalla suunnitteluohjeiden avulla kokoonpanemisessa mahdollisesti ilmenneviä ongelmia. DFA suunnitteluohjeet käsittelevät esimerkiksi kokoonpanosuuntia, kiinnitysmenetelmiä ja osien symmetriaa. Suurin osa suunnitteluohjeista on hyvin yksinkertaisia ja ilmeisiä, mutta silti ne auttavat suunnittelijaa tiedostamaan monia kokoonpanemiseen vaikuttavia tekijöitä. Tuotteen kokoonpanemisen kannalta suunnitteluinsinöörien ja valmistusinsinöörien yhteistyö on hyvin suositeltavaa.

DFA:n avulla saavutetaan säästöjä kokoonpanokustannuksissa ja monesti myös osien aiheuttamissa kustannuksissa. Monessa tapauksessa yksi hieman monimutkaisempi osa on edullisempi valmistaa kuin monta yksinkertaisempaa osaa. DFA:n avulla voidaan yksinkertaistuneen tuoterakenteen kautta saavuttaa myös tuotteen laadun ja huollettavuuden kasvamista. Tämä on kuitenkin tapauskohtaista, ja DFA:n hyödyntämisen kautta löydettyjen parannusehdotuksien vaikutusta esimerkiksi tuotteen suorituskykyyn ja kierrätettävyyteen tulee arvioida. Jotta vaihtoehtoisia tuoterakenteita ja tuotteeseen tehtyjä muutoksia voidaan arvioida, on suunnittelijalla hyvä olla käytössään analysointityökaluja. Tällaiset työkalut voivat olla esimerkiksi yksinkertaisia kaavoja, joissa on muuttujina osamääriä ja kokoonpanoaikoja.

Case-tuotteena toimineen moottoripyörän sylinterikannen rakennetta saatiin DFA:n avulla yksinkertaistettua ja osamäärää pienennettyä. Ehdotettujen muutoksien vaikutusta pystyttiin arvioimaan DFA-analysointityökalun avulla, kun rakenteelle määritettiin suunnittelutehokkuus. Muutoksien kannattavuus kuitenkin riippuu käytännössä myös valmistuskustannuksista ja muutoksien vaikutuksesta tuotteen suorituskykyyn.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUOTTEEN SUUNNITTELU KOKOONPANON KANNALTA	3
2.1 DFA:n tavoitteet ja hyödyt	3
2.2 DFA suunnittelun alkuvaiheissa	4
2.3 Tuotteen rakenteen yksinkertaistaminen	6
2.4 Liitosmenetelmät	7
2.4.1 Purettavat liitokset	7
2.4.2 Vaikeasti purettavat tai pysyvät liitokset	8
2.5 Kokoonpanemisen helpottaminen	9
2.5.1 Symmetria, takertuminen ja liitoksien huomioiminen	9
2.5.2 Kokoonpanosuunnat ja alikokoonpanot	12
2.5.3 Osien paikoittuminen ja toleranssit	12
2.6 Kokoonpaneminen käsin tai automatisoidusti	14
2.7 Kokoonpantavuuden analysointi	16
3. MOOTTORIPYÖRÄN SYLINTERIKANNEN DFA-SUUNNITTELU	20
3.1 Sylinterikannen rakenne ja kokoonpanomyönteisyys	20
3.2 Sylinterikannen kokoonpantavuus verrattuna vanhempaan malliin	24
3.3 Sylinterikannen kokoonpantavuuden kehittäminen	26
4. YHTEENVETO	29
LÄHTEET	31

1. JOHDANTO

Vuonna 1988 Ford Motor Company raportoi säästäneensä miljardeja dollareja panostaessaan Taurus-mallinsa suunnittelussa valmistettavuuteen ja kokoonpantavuuteen (Boothroyd et al. 2010). Tässä opinnäytetyössä käsitelläänkin sitä, miten tuotteen kokoonpantavuutta voidaan parantaa ja millaisia hyötyjä kokoonpanemisen helpottumisen kautta voidaan saavuttaa. Tuotteiden kokoonpanemisen helpottamista on ehditty tutkia jo vuosikymmeniä, sillä se on ollut relevantti aihe viimeistään siitä lähtien kun tuotteiden sarjatuotanto on aloitettu. Merkittäviä tuotteiden kokoonpantavuutta ja valmistettavuutta tutkineita henkilöitä ovat mm. Geoffrey Boothroyd ja Peter Dewhurst, jotka palkittiin vuonna 1991 ”the National Medal of Technology” -palkinnolla tunnustuksena heidän tekemänsä työn hyödyistä Yhdysvaltojen teollisuudelle (Boothroyd Dewhurst, Inc.).

Tässä opinnäytetyössä perehdytään kokoonpanemisen helpottamisen taustalla olevaan teoriaan kirjallisuuden avulla ja sovelletaan tätä teoriaa case-tuotteena toimivaan moottoripyörän sylinterikanteen. Keskeisiä kysymyksiä, joihin tämän opinnäytetyön on tarkoitus antaa vastauksia, ovat seuraavat:

1. Miten tuotteen kokoonpanemista voidaan helpottaa suunnitelmassa tuotetta?
2. Miksi on tärkeää kiinnittää huomiota tuotteen kokoonpantavuuteen?
3. Miten tässä opinnäytetyössä esitelty teoria näkyy case-tuotteen suunnittelussa?
4. Miten case-tuotteen kokoonpanemista voitaisiin edelleen helpottaa tässä opinnäytetyössä esitetyin keinoin?

Tarvittava teoria etsitään lähdemateriaalien tietoja yhdistelemällä ja vertailemalla. Soveltavassa osiossa case-tuotetta tutkitaan purkamalla se ja analysoimalla sen osia ja rakennetta. Case-tuotteen rakennetta myös verrataan vanhemman samaa mallisarjaa edustavan tuotteen rakenteeseen, jotta voidaan havaita, miten kyseisen tuotteen kokoonpantavuus on ajan myötä kehittynyt.

Tämän opinnäytetyön on tarkoitus tarjota sellaista tietoa, joka auttaa aiheeseen perehtymätöntä lukijaa huomioimaan tuotteiden kokoonpantavuuden tuotesuunnittelussa paremmin. Lukijan ei tarvitse olla perehtynyt aiheeseen aiemmin ymmärtääkseen tämän opinnäytetyön tarjoamaa tietoa, mutta hänellä oletetaan kuitenkin olevan ymmärrystä tuotesuunnittelusta ja yksinkertaisista koneista.

Luvussa 2 käsitellään kokoonpanemisen helpottamisen taustalla olevaa teoriaa. Luvussa käydään läpi kokoonpanemisen helpottamisesta seuraavia hyötyjä ja keinoja näiden hyötyjen saavuttamiseksi. Luvussa 3 analysoidaan ja kehitetään case-tuotteen kokoonpantavuutta. Luvussa 4 esitellään tämän opinnäytetyön keskeiset tulokset ja arvioidaan opinnäytetyön onnistumista tutkimusongelmiin vastaamisessa.

2. TUOTTEEN SUUNNITTELU KOKOONPANON KANNALTA

2.1 DFA:n tavoitteet ja hyödyt

DFA (engl. Design For Assembly, suunnittelu kokoonpanon kannalta) tarkoittaa tuotteen suunnittelua kokoonpanomyönteisesti (Boothroyd et al. 2010). Kokoonpanolla tarkoitetaan tässä työssä tuotetta tai sen osakokonaisuutta (alikoospano), joka muodostuu useista osista. Kokoonpaneminen puolestaan tarkoittaa toimintaa, jolla nämä yksittäiset osat tai alikoospanot saatetaan yhteen. DFA:n keskeisin periaate on vähentää asennusoperaatioiden määrää vähentämällä osien lukumäärää sekä tehdä asennusoperaatioista helpompia suorittaa (Boothroyd et al. 2010).

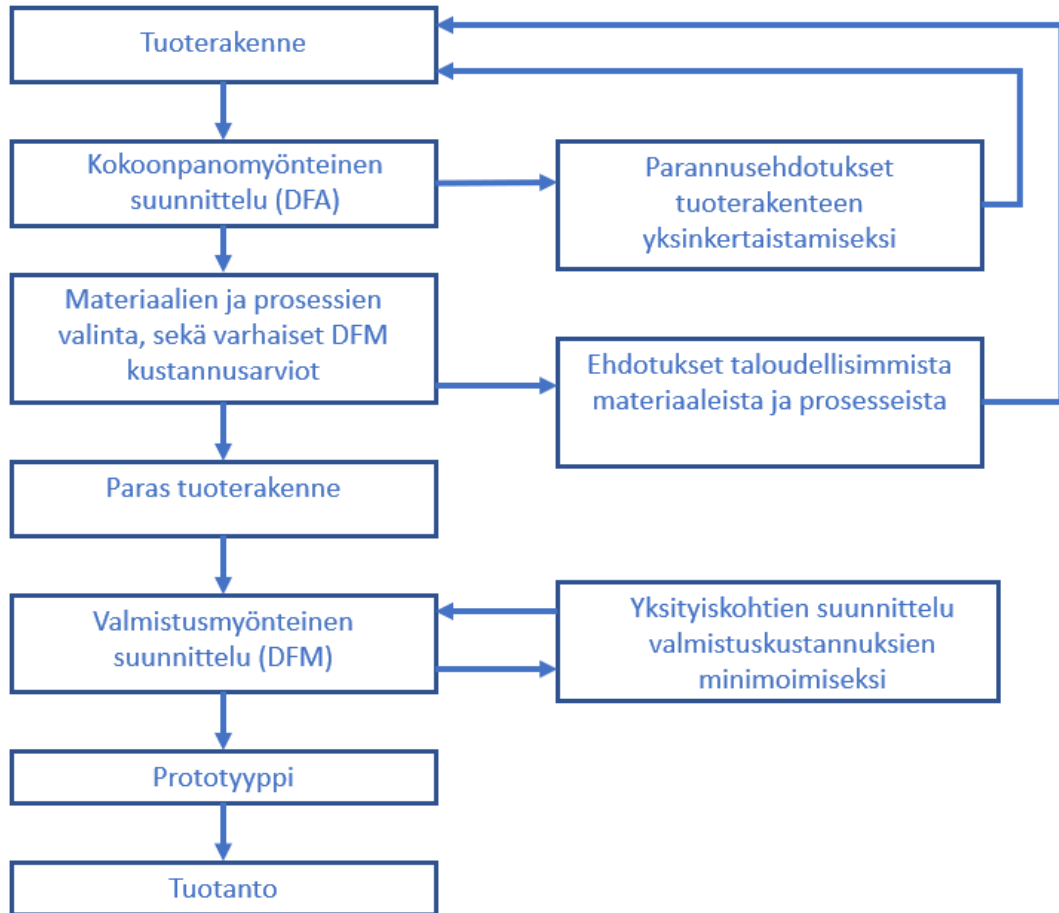
Osien lukumäärän vähenemisestä seuraa monia hyötyjä. Eliminoitua osaa ei tarvitse suunnitella, hankkia, varastoida, tarkistaa tai kierrättää (Lempiäinen & Savolainen 2003). Lisäksi osan poistaminen poistaa samalla tarpeen kaikelle osaa koskevalle dokumentaatiolle. DFA:n avulla saavutetaan kokoonpanokustannusten vähenemisen lisäksi merkittäviä säästöjä osien hinnassa. (Boothroyd et al. 2010) Osien määrän vähentäminen ja tuotteen rakenteen yksinkertaistaminen vähentävät erilaisten asennusoperaatioiden määrää, jolloin myös tarve tilalle ja työntekijöille vähenee (Whitney 2004).

DFA:n on myös osoitettu parantavan tuotteen laatua ja huollettavuutta. Oikein käytettynä DFA yksinkertaistaa tuotteen rakennetta ja täten myös vähentää kokoonpanotyössä tapahtuvien virheiden määrää. Huollettavuus paranee, kun tuotteen purkaminen ja kokoaminen helpottuu yksinkertaisemman tuoterakenteen ansiosta. (Boothroyd et al. 2010) DFA:n avulla saavutettu yksinkertaisempi rakenne on usein myös luotettavampi (Booker & Swift 2003; Boothroyd et al. 2010). Lisäksi oikeanlaisia DFA-analysointityökaluja käyttämällä tuotekehitysaika lyhenee, sillä suunnittelijat saavat palautetta tekemistään ratkaisuksista jo suunnittelun aikana. (Boothroyd et al. 2010) DFA:n avulla tuote saadaan myös nopeammin markkinoille (Dalgleish et al. 2000; Booker & Swift 2003; Boothroyd et al. 2010).

2.2 DFA suunnittelun alkuvaiheissa

Andreasen et al. (1988) ja Boothroyd et al. (2010) esittävät, että 70 % tuotteen kustannuksista määräytyy suunnitteluvaiheessa. Lisäksi Lempiäinen ja Savolainen (2003) esittävät, että tuotteeseen tehtyjen muutoksien aiheuttamat kustannukset suunnitteluvaiheessa ovat vain 1–10 % siitä, mitä ne ovat, kun tuotanto on jo alkamassa. Loppuun asti suunnittelussa tuoterakenteessa suurinta osaa DFA:n avulla saavutettavista hyödyistä ei voida enää saavuttaa (Dalglish et al. 2000). Näistä syistä DFA:ta tulee soveltaa tuotteen suunnitteluun mahdollisimman aikaisessa vaiheessa.

Tuotteen kustannukset alkavat sitoutua suunnittelun alussa kiihtyvällä tahdilla. Tietoisuus tehtyjen ratkaisujen vaikutuksesta lisääntyy kuitenkin paljon hitaammin. (Lempiäinen & Savolainen 2003) Siksi on tärkeää, että tuotekehitystiimillä on työkaluja eri vaihtoehtojen vertailuun. Perinteisesti on ajateltu, että suunnitteluinsinöörit suunnittelevat tuotteen ja valmistusinsinöörit valmistavat sen. Tällöin valmistusinsinöörit kohtaavat valmistukseen liittyviä ongelmia, koska he eivät ole olleet osana tuotteen suunnittelua. (Boothroyd et al. 2010) Ongelman merkitys korostuu nykyään yhä enemmän, sillä Moultrien ja Maierin (2014) mukaan ulkomaille ulkoistettu tuotanto saattaa erottaa suunnitteluinsinöörit ympäristöstä, jossa heidän suunnittelemiensa tuotteita valmistetaan. Jotta kokoonpaneminen osattaisiin ottaa suunnittelussa huomioon, täytyy suunnitteluinsinöörin olla erityisen tietoinen kokoonpanemiseen liittyvistä ongelmista, tai sitten suunnittelutiimissä täytyy olla alan asiantuntija (Andreasen et al. 1988). Lempiäinen ja Savolainen (2003) ehdottavatkin, että suunnittelijaa tulee mitata kyvyssä parantaa tuotteen valmistettavuutta ja valmistusosastoa kyvyssä auttaa tuotteen suunnittelussa.



Kuva 1. Tyypilliset suunnitteluvaiheet DFMA:ta hyödynnettäessä. Mukailtu lähteestä (Boothroyd et al. 2010).

Kuvassa 1 esitetään tyypilliset suunnitteluvaiheet DFMA:ta hyödynnettäessä. DFM (engl. Design For Manufacture, suunnittelu valmistuksen kannalta) tarkoittaa tuotteen komponenttien suunnittelua valmistusmyönteisesti. DFMA puolestaan käsittää sekä DFM:n että DFA:n. (Boothroyd et al. 2010) Tuotteen suunnittelu on iteratiivinen prosessi. Vaihtoehtoiset tuoterakenteet on suunniteltava mahdollisimman yksinkertaisiksi ja helppoiksi kokoonpanna. Kullekin vaihtoehdolle tulee valita sopivimmat materiaalit ja valmistusprosessit sekä arvioida kustannuksia. Tarvittaessa palataan taaksepäin ja tehdään muutoksia. Dagleish et al. (2000) esittävät, että DFA-menetelmät tarjoavat usein tietoa valmiista tuoterakenteista, mutta eivät juurikaan ohjaa suunnittelijaa valinnoissa suunnittelun aikana. He kehottavatkin hakemaan samankaltaisuuksia ja ratkaisuja muista tuotteista ja miettimään kokoonpanojärjestystä jo varhain, sillä kokoonpanojärjestyksen miettiminen voi lisätä suunnittelijan tietoisuutta kokoonpanemiseen liittyvistä ongelmista merkittävästi.

2.3 Tuotteen rakenteen yksinkertaistaminen

Boothroyd et al. (2010) esittävät, että suunnittelusäännöt ja -ohjeet, jotka keskittyvät yksinkertaistamaan yksittäisiä komponentteja, johtavat monimutkaiseen tuoterakenteeseen ja suureen osamäärään. Tämä on varmasti totta ainakin siltä osin, ettei yksittäisten osien yksinkertaistaminen johda tuotteen rakenteen merkittävään yksinkertaistumiseen. Osien rakenteen yksinkertaistamisen sijaan pitäisi hyödyntää valmistusmenetelmien potentiaalia, jotta tuoterakenne saadaan pidettyä mahdollisimman yksinkertaisena (Andreasen et al. 1988; Boothroyd et al. 2010) Lempiäisen ja Savolaisen (2003) mukaan CNC- ja levytyötekniikoiden kehityksen myötä on yleensä parempi vaihtoehto korvata monta yksinkertaista osaa pienemmällä määrällä monimutkaisempia osia. Osien vähentämistä voidaan helposti hyödyntää muovista valmistetuissa tuotteissa, sillä ruiskuvalamalla voidaan valmistaa geometrialtaan monimutkaisiakin osia (Eteläaho et al. 1999). Yhden monimutkaisemman muotin valmistaminen on usein edullisempaa kuin kahden yksinkertaisen (Bryce 1997; Ulrich & Eppinger 2012). Brycen (1997) mukaan muottien hinnat vaihtelevat muutamasta tuhannesta useisiin satoihin tuhansiin dollareihin, joten volyymin on suuri merkitys valmistustekniikan valinnassa.

Sen lisäksi että osien määrän vähentäminen vähentää kokoonpanokustannuksia, se usein myös vähentää osien yhteenlaskettua hintaa merkittävästi (Boothroyd et al. 2010). Boothroyd et al. (2010) esittävätkin kolme kysymystä osan tarpeellisuuden arviointia varten:

1. Liikkuuko osa suhteessa muihin osiin tuotetta käytettäessä? Liikkeellä ei tässä yhteydessä tarkoiteta liikettä, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi osan elastisuudella.
2. Onko osan välttämätöntä olla eri materiaalia kuin muut osat tai olla eristetty muista osista tuotteen toiminnan kannalta (esim. lämmön, sähköön tai värinän eristys tai johtaminen)?
3. Täytyykö osan olla erillinen muista osista, jotta tuotteen kokoonpaneminen tai purkaminen on mahdollista?

Näillä kolmella kriteerillä arvioidaan osien tarpeellisuutta ja pyritään eliminoimaan rakenteesta turhat osat. Näin voidaan saavuttaa suuria säästöjä kokoonpano- ja valmistuskustannuksissa tuoterakenteen yksinkertaistumisen avulla. (Boothroyd et al. 2010) ja Andreasen et al. (1988) mukaan DFA:n avulla saavutettavat suurimmat parannukset tapahtuvatkin tuotteen rakenteen muuttumisen kautta. Edellä mainitut kolme kohtaa eivät kuitenkaan ota kantaa esimerkiksi tuotteen estetiikkaan, joten tuotteissa usein on tällai-

sen arvioinnin mukaan ”turhia” osia (Lempiäinen & Savolainen 2003). Osien määrän vähentäminen voi kuitenkin joissain tapauksissa johtaa tarkoitettua huonompaan lopputulokseen, ja siksi asioita pitää aina ajatella tapauskohtaisesti. Monissa tapauksissa monta samanlaista osaa saattaa olla edullisempi vaihtoehto kuin pienempi määrä keskenään erilaisia osia (Lempiäinen & Savolainen 2003). Osien määrän vähentäminen voi vaikuttaa myös tuotteen huollettavuuteen. Jos tuotteen täytyy olla hyvin huollettavissa, täytyy kuluvien osien olla muusta rakenteesta erillisiä, edullisia ja helposti vaihdettavissa (Whitney 2004). Tuotteen purkaminen ei aina myöskään ole käänteinen operaatio tuotteen kokoonpanemiselle. Jotkin tuotteet tulee voida purkaa rikkomatta komponentteja uudelleenkäyttöä ja kierrätystä varten. Tuotteen purkaminen on noussut yhä keskeisempään asemaan ympäristötietoisuuden ja luonnonvarojen vähenemisen myötä (Desai et al. 2008).

2.4 Liitosmenetelmät

Joissain tapauksissa liitososat muodostavat suuren osuuden kaikista tuotteen osista (Lempiäinen & Savolainen 2003). Liitosmenetelmät vaikuttavat ratkaisevasti kustannuksiin ja tuotteen laatuun (Andreasen et al. 1988). Erilaiset liitosmenetelmät tarvitsevat erilaisia liitostyökaluja, ja näin hidastava kokoonpanemista (Lempiäinen & Savolainen 2003). Esimerkiksi jos käytössä on ruuveja, jotka kiinnitetään erilaisilla työkaluilla, kuluu aikaa työkalujen vaihtamiseen. Ja vaikka käytössä olisikin vain yksi liitosmenetelmä, kannattaa suosia keskenään samanlaisia liitososia, jotta ei esimerkiksi ole mahdollista laittaa eri pituisia ruuveja väärin paikkoihin (Whitney 2004). Näistä syistä on toivottavaa pitää erilaisten liitososien määrä minimissä.

2.4.1 Purettavat liitokset

Yksi tapa vähentää liitososien määrää on integroida liitososat liitettäviin kappaleisiin käyttämällä napsausliitosta. Napsausliitoksessa osassa sijaitsevat ulokkeet lukittuvat vastakappaleeseen jousivoiman vaikutuksesta (Lempiäinen & Savolainen 2003). Napsausliitos on kokoonpanossa tehokas, sillä liittäminen tapahtuu yksinkertaisesti puristamalla kappaleet yhteen. Napsausliitos on myös mahdollista toteuttaa niin, ettei se näy tuotteesta ulospäin ollenkaan. Liitettäessä muoviosia napsausliitoksella, liitoksen ominaisuudet kuitenkin muuttuvat muovin ominaisuuksien muuttuessa. Muovin elastisuus vähenee uv-säteilyn ja lämmön vaikutuksesta, jolloin liitos voi hajota sitä avatessa tai sulkiessa. (Lempiäinen & Savolainen 2003) Tuotteiden kierrätys ja korjaus ovat nousseet viime vuonna yhä merkityksellisempään asemaan, eikä napsausliitos yleensä edistä niitä

(Whitney 2004). Napsausliitoksen avaamista voidaan kuitenkin helpottaa suunnittelemalla liitokseen painike, jolla jousivoima voidaan vapauttaa (Lempiäinen & Savolainen 2003).

Lempiäinen ja Savolainen (2003) esittävät, että noin 80 % kokoonpanoissa käytettävistä liitoksista on ruuviliitoksia. Mahdollisuudet ruuvien lukumäärän vähentämisestä tai ruuviliitoksen korvaamisesta riippuvat siitä, millaisia vaatimuksia liitokseen kohdistuu. Jos ruuvit ovat sijoitettu liian harvaan, ruuvien kantojen alla paine on paljon suurempi kuin materiaalissa ruuvien välillä. Jos liitoksesta täytyy saada tiivis eikä kappaleiden haluta värähtelevän toistensa suhteen, on ruuvien oikeanlainen sijoittelu hyvin tärkeää. Ruuvien määrän vähentäminen kokoonpanemisen nopeuttamiseksi ei ole enää yhtä merkittävässä asemassa käsityökalujen ja automaation kehityksen myötä. (Whitney 2004) Ruuvia ei kannata kuitenkaan lisätä rakenteeseen pelkästään osan paikoittamista varten, vaan sitä varten osiin voidaan lisätä paikoittavia piirteitä. Jos ruuviliitos on jatkuvasti alttiina värähtelylle, tarvitaan usein erillistä sideainetta, joka estää ruuviliitoksen löystymisen itsestään. Ruuviliitoksissa käytetään usein myös aluslevyjä, mutta kokoonpanoa voidaan helpottaa integroimalla aluslevy ruuviin. (Lempiäinen & Savolainen 2003)

2.4.2 Vaikeasti purettavat tai pysyvät liitokset

Ruuvien tavoin niiteillä tai sideaineilla on mahdollista kiinnittää kappaleet tiiviisti ja tiukasti toisiaan vasten. Niitin etuna ruuvin on se, ettei niitti löysty värähtelyn vaikutuksesta, kuten ruuville voi käydä. Nämä ratkaisut voivat kuitenkin olla ongelmallisia huolletavuutta ja kierrätettävyyttä ajatellen. Niitit täytyy porata tai jollain muulla tavalla tuhota liitoksen purkamista varten. Sideaineilla kiinnitetyt kappaleet puolestaan saattavat hajota liitosta purkaessa. Jos näin tapahtuu, ja kappaleet ovat eri materiaaleista valmistettu, voi kierrätys vaikeutua. (Whitney 2004) Lisäksi huollettaessa vanhan sideaineen poistamiseen kuluu aikaa.

Kaarihitsaukseen metallien liitosmenetelmänä kokoonpanossa liittyy monia haasteita. Liitettävien materiaalien on oltava ominaisuuksiltaan hyvin lähellä toisiaan, jotta kaarihitsaus on mahdollista. Kaarihitsaus vaatii usein myös esivalmisteluja, kuten railon valmistuksen. Kaarihitsauksen aikana kehittyvä lämpö aiheuttaa muotovirheitä ja tuhoaa materiaalin pintakäsittelyn. Ohutlevytuotteissa käytettävällä laserhitsauksella voidaan kuitenkin kiertää monia kaarihitsauksen haittoja. Pienempi lämmön muodostuminen rajoittaa muodonmuutoksia ja materiaaliominaisuuksien muuttumista. Laserhitsaus on myös kaarihitsausta nopeampaa. (Lempiäinen & Savolainen 2003) Hitsattu liitos on vahva, ei aukea värähtelyn vaikutuksesta, mutta täytyy aina tuhota purkamista varten. (Whitney

2004) Hitsattu liitos ei tuo kokoonpanoon ylimääräisiä liitososia, mutta sen haittapuolet tekevät siitä monessa tapauksessa kannattamattoman vaihtoehdon kokoonpanossa.

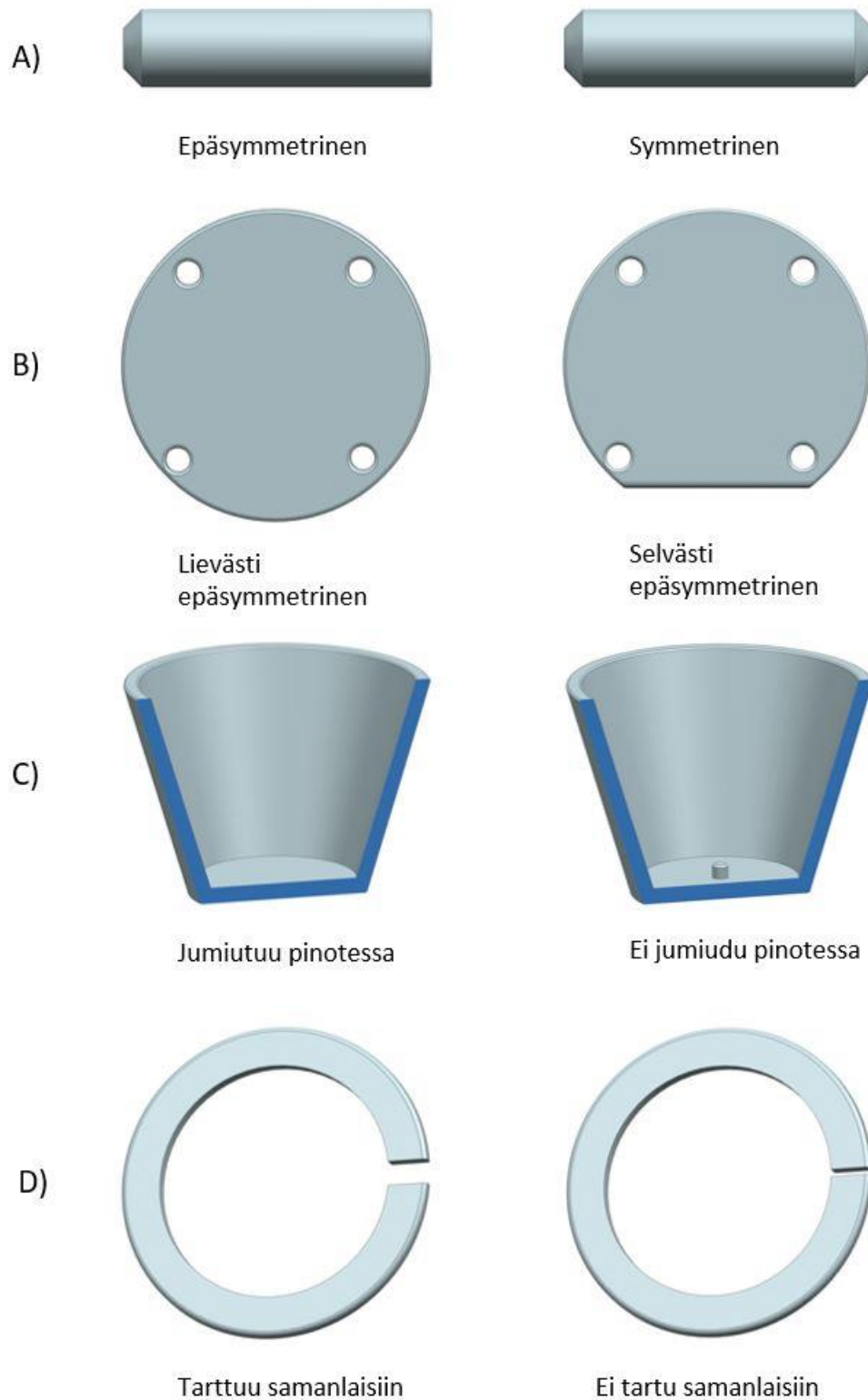
2.5 Kokoonpanemisen helpottaminen

Osien lukumäärän lisäksi kokoonpanokustannuksiin vaikuttavat osan käsittelyn, paikalleen asettamisen ja kiinnittämisen vaikeus (Boothroyd et al. 2010). Suunnittelemalla osien muoto tarkoitukseen sopivasti, voidaan helpottaa osan kuljettamista, poimimista ja asentamista.

Desai et al. (2008) esittävät, että kokoonpanosta tulee tehdä täysin objektiivista, jolloin kokoonpanijan ei tarvitse tehdä päätöksiä esimerkiksi säätöjen suhteen. Tämän lisäksi tulee myös ottaa huomioon, suoritetaanko tuotteen kokoonpaneminen työntekijöiden vai asiakkaan toimesta (Pahl et al. 2007). Ulrichin ja Eppingerin (2012) mukaan, asiakkaat saattavat laiminlyödä kokoonpano-ohjeita, joten tuotteen suunnittelu helposti asiakkaan koottavaksi on hyvin haastavaa.

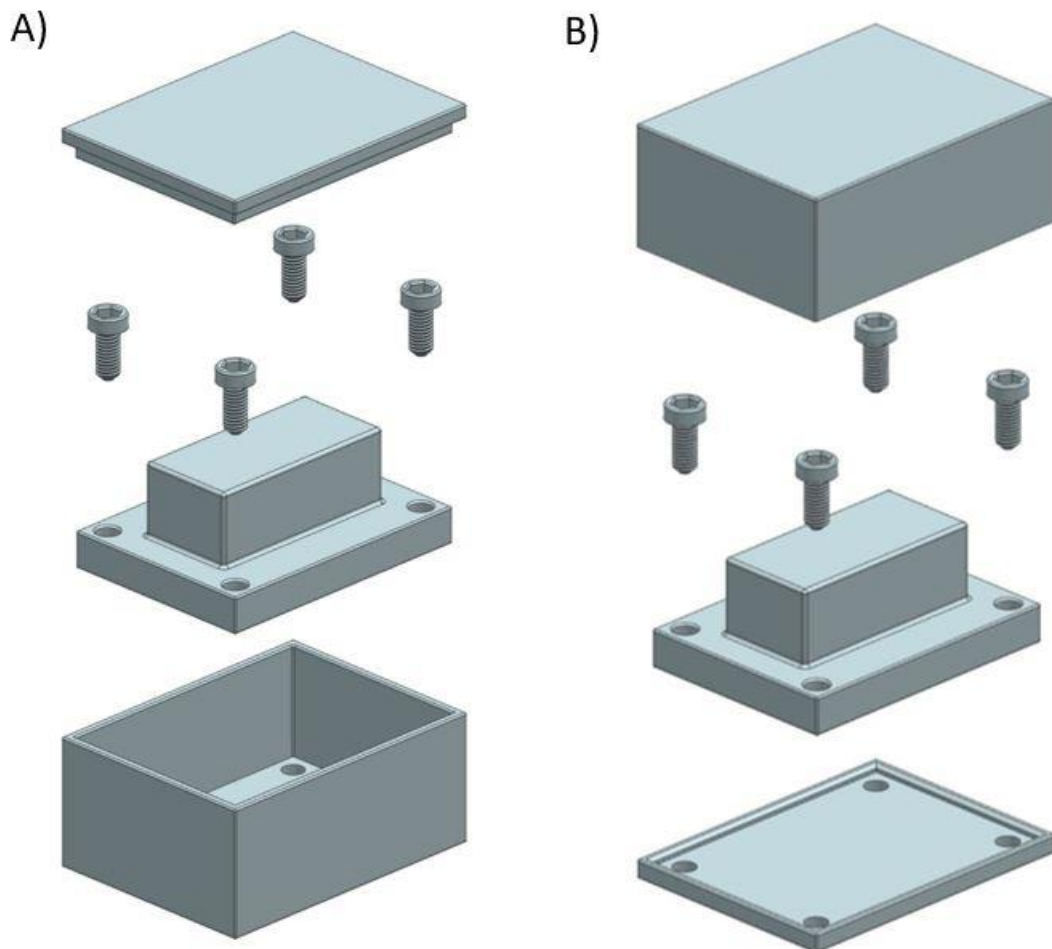
2.5.1 Symmetria, takertuminen ja liitoksien huomioiminen

Lempiäisen ja Savolaisen (2003) mukaan osien symmetrialla voidaan helpottaa osan syöttämistä ja vähentää riskiä virheisiin. Osien käsittely syöttölaitteessa onnistuu parhaiten, kun ne ovat symmetrisiä tai selkeästi epäsymmetrisiä. (Lempiäinen & Savolainen 2003) Ihmisen voi olla vaikea erottaa lievästi epäsymmetrisiä osia, jolloin vaarana on asentaa osa väärään paikkaan tai väärään asentoon



Kuva 2. Osien käsittelyä ja asennusta helpottavia piirteitä. Mukailtu lähteestä (Boothroyd et al. 2010)

Kuvassa 2 on havainnollistettu, kuinka yksinkertaisilla muutoksilla voidaan helpottaa osan poimimista ja helpottaa asentamista. Huonosti suunnitellut osat voivat tarttua toisiinsa, jolloin kokoonpanotyö hidastuu. Korostettu epäsymmetrisyys auttaa päättämään osan oikean asennon (Hurst 1999; Boothroyd et al. 2010). Toisaalta, symmetrisellä osalla on useampia oikeita asentoja.



Kuva 3. Vaihtoehtoisia tuoterakenteita. Mukailtu lähteestä (Boothroyd et al. 2010).

Liitososien paikkaa suunnitellessa tulee kiinnittää huomiota vapaaseen tilaan ja näköesteisiin. Liitosan, kuten ruuvien tai nitien, sekä tarvittavan työkalun tulee mahtua paikallensa. Kuvassa 3 on esitetty tuoterakenteelle A vaihtoehtoinen tuoterakenne B, jossa ruuvien ympärillä on merkittävästi enemmän asennustilaa ja vähemmän näköesteitä. Ruuvien asentamista voidaan myös helpottaa vastakappaleen reiän muotoilulla lisäämällä siihen

kierteetön osuus, joka paikoittaa ruuvien ja pitää sen pystyssä. Toinen vaihtoehto on käyttää ruuvia, jossa on kärjessä kierteetön osuus tai kartio, joka keskittää ruuvien reikään. (Boothroyd et al. 2010)

2.5.2 Kokoonpanosuunnat ja alikokoonpanot

Lempiäisen ja Savolaisen (2003) mukaan ylhäältä alaspäin tapahtuva suoraviivainen kokoonpanoliike on helpoin sekä ihmiselle että kokoonpanorobotille. Kokoonpanosuuntia tulisi olla mahdollisimman vähän, sillä kokoonpanosuunnan vaihtuminen hidastaa kokoonpanemista, kun kappaletta tarvitsee käänellä (Lempiäinen & Savolainen 2003). Ylhäältä alaspäin suuntautuvan kokoonpanon etuna on myös osien pysyminen paikallaan painovoiman vaikutuksesta, mikäli niissä on itsekeskittäviä piirteitä (Whitney 2004). Kokoonpanokiinnittimien käyttämiseltä vältytään, kun kokoonpanossa on selkä runko-osa, jolla on stabiili kokoonpanotyöhön sopiva asento (Lempiäinen & Savolainen 2003). Whitney (2004) kuitenkin esittää, että joissain tapauksissa voi olla edullista valita osaksi, jonka päälle kokoonpanoa aletaan rakentamaan, jokin aivan muu kuin tuotteen runko-kappale. Joissain tapauksissa tällä voidaan välttyä tuotteen tai sen alikokoonpanojen kääntelyltä kokoonpanemisen aikana. (Whitney 2004)

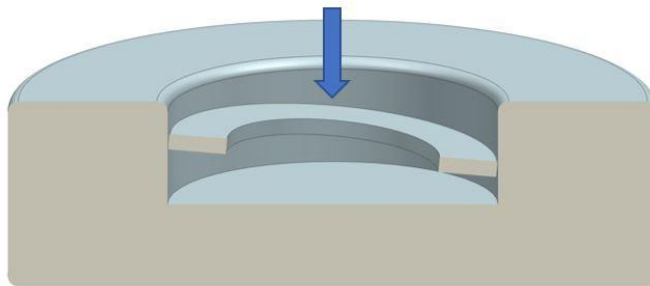
Jos tuote jaetaan alikokoonpanoihin, tulisi alikokoonpanot suunnitella niin, että niiden toiminta on mahdollista testata jo ennen niiden yhdistämistä (Lempiäinen & Savolainen 2003). Eteläahon et al. (1999) mukaan kokoonpanosuunnat tulisi huomioida siten, että alikokoonpanot pystyttäisiin kokoonpanemaan yhtä kokoonpanosuuntaa käyttäen, ja vastaavasti alikokoonpanot yhdistämään yhtä kokoonpanosuuntaa käyttäen. Myös Andreasen et al. (1988) suosittelevat tuotteen jakamista rinnakkain kokoonpantaviin ja erikseen testattaviin alikokoonpanoihin. Tuotteen räätälöinti tietyksi variantiksi kannattaa jättää mahdollisimman myöhäiseen vaiheeseen kokoonpanoprosessia, jotta varianttien välillä voidaan hyödyntää mahdollisimman paljon samoja alikokoonpanoja ja kokoonpanoprosesseja (Lempiäinen & Savolainen 2003).

2.5.3 Osien paikoittuminen ja toleranssit

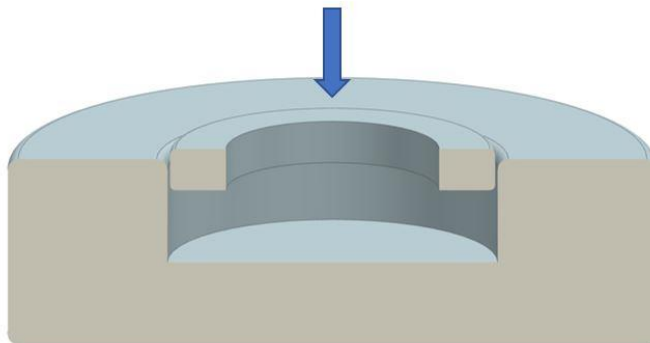
Joskus osien vähentäminen voi tuoda lisää haasteita kokoonpanoon. Esimerkiksi ruuvien määrän vähentäminen voi johtaa tilanteeseen, jossa yhdellä ruuvilla pitäisi kiinnittää samanaikaisesti kolme osaa. Tällöin voi olla haasteellista pitää kaikkia osia oikeassa paikassa ruuvia asettaessa. Ongelmia voidaan kuitenkin ratkoa suunnittelemalla osiin

paikoittavia piirteitä, kuten viisteitä, olakkeita tai ohjaustappeja. (Lempiäinen & Savolainen 2003) Esimerkiksi tilanteessa, jossa asetetaan pyöreää tappia reikään, asentamista nopeuttaa eniten, kun suora viiste on suunniteltu molempiin liitokseen osallistuviin kapaleisiin. Geometrialtaan pyöreä viiste helpottaa asennusta vielä tätäkin vaihtoehtoa enemmän.

Osa voi jumiutua



Osa ei jumiudu

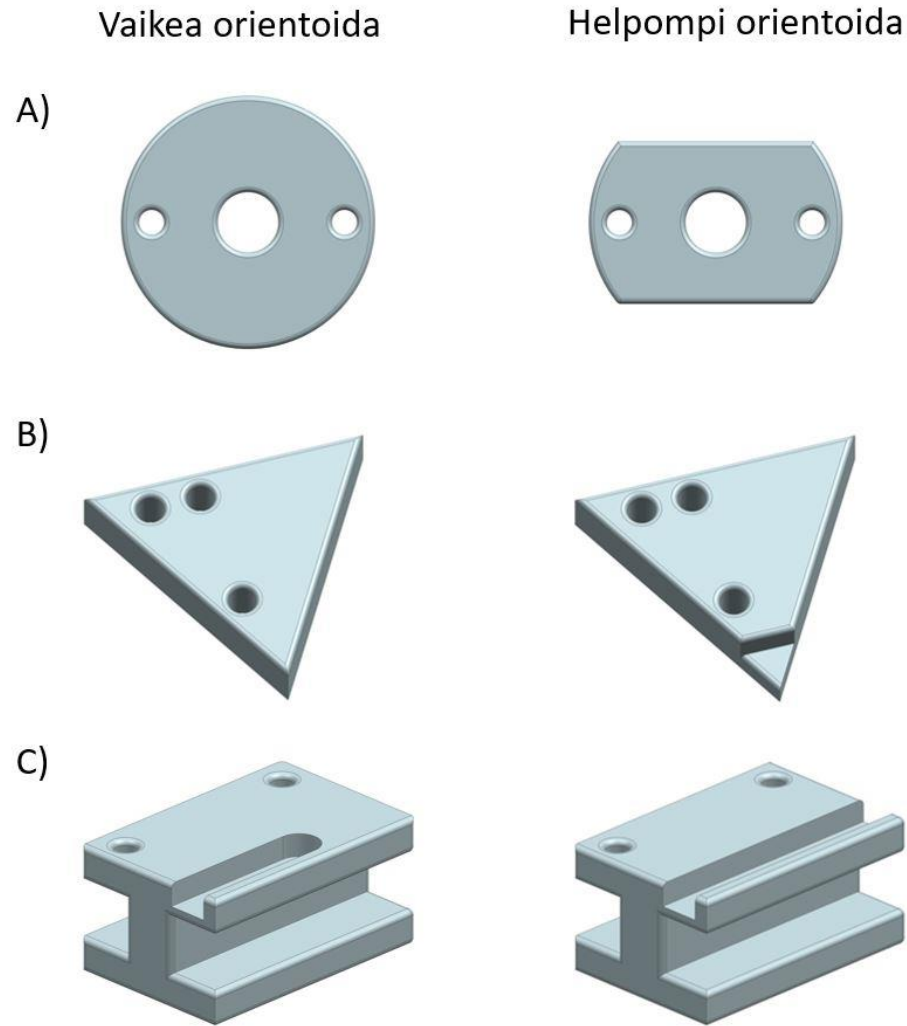


Kuva 4. Vääränlainen suunnittelu voi johtaa osan kiilautumiseen. Mukailtu lähteestä (Boothroyd et al. 2010).

Myös riittävän suuret toleranssit osien välillä auttavat osien asettamista paikallensa, mutta toisaalta liian suuret raot voivat aiheuttaa osien kääntymistä ja kiilautumista väärään asentoon. (Boothroyd et al. 2010) Kuvassa 4 on esitetty, kuinka pienillä muutoksilla voidaan estää osan jumiutuminen.

2.6 Kokoonpaneminen käsin tai automatisoidusti

Boothroyd et al. (2010) mukaan yksi suurimpia hyötyjä siirryttäessä käsin kokoonpanosta automatisoituun kokoonpanoon, on tuoterakenteen yksinkertaistuminen. Tämä ei tietenkään toteudu, jos tuoterakennetta ei suunnitella uudelleen. Kokoonpanemista automatisoidessa tuotteen rakenteen uudelleen suunnittelu on kuitenkin usein järkevää. Tällöin tuotteen rakenteen yksinkertaistumisella saavutettavat säästöt ovatkin usein suurempia kuin itse automatisoinnin tuomat säästöt. (Boothroyd et al. 2010) Lempiäisen ja Savolaisen (2003) mukaan tuote tulisi suunnitella automaattista kokoonpanoa ajatellen, koska kokoonpano on usein työvoimavaltaisin alue tuotteen valmistuksessa. Jos tuote on helppo kokoonpanna automatisoidusti, sen kokoonpaneminen on usein helppoa myös käsin (Andreasen et al. 1988; Lempiäinen & Savolainen 2003; Pahl et al. 2007). Tämä ei kuitenkaan ole totta, jos kokoonpanemiseen kohdistuu suuria voima- ja tarkkuusvaatimuksia (Andreasen et al. 1988).



Kuva 5. Osan geometria vaikuttaa merkittävästi osan orientoitavuuteen kuljettimessa. Mukailtu lähteestä (Boothroyd et al. 2010).

Kuljettimia ja syöttölaitteita käytettäessä osaan voidaan lisätä piirteitä, joiden avulla osa voidaan orientoida valmiiksi oikeaan asentoon automaattista kokoonpanoa varten. Kuvassa 5 on esitetty piirteitä, jotka mahdollistavat osan kulkemisen kuljettimessa vain yhdessä asennossa.

Automaattisilla tarkoitukseen suunnitelluilla laitteilla voidaan pieniäkin osia asettaa paikalleen suurella nopeudella (Whitney 2004). Ihminen tarvitsee pienen osan käsittelyyn pinsetit tai vastaavan tartuntavälineen. Piirteitä, jotka aiheuttavat tarpeen erilliselle tartuntatyökalulle tulisi välttää, sillä osan orientoiminen esimerkiksi pinseteillä on hitaampaa kuin käsin. Tällaisia piirteitä voivat osan koon lisäksi olla esimerkiksi ahdas asennustila tai korkea lämpötila. Myös suuret tai raskaat osat hidastavat kokoonpanoa, sillä niiden

käsittely vaatii molempia käsiä. (Boothroyd et al. 2010) Ihmisen fyysinen kyvykkyys rajoittaa raskaiden kappaleiden käsittelyn lisäksi myös asennusoperaatioissa käytettävää voimaa. Apuvälineiden avulla voidaan ihmisen rajallista voimantuottoa lisätä, mutta tähänkin liittyy rajoitteita. Istuma-asennossa ammattikäyttöön suunniteltua konetta käytettäessä suositellaan ihmisen kohdistavan korkeintaan 50 N voiman ylöspäin ja 70 N voiman alaspäin (Suomen standardoimisliitto 2009).

Ihminen osaa mukautua aiemmissä vaiheissa tapahtuneisiin virheisiin ja tunnistaa virheelliset osat. Siltikään ei ole toivottavaa, että kokoonpanotyö muuttuu virheellisten osien korjaamiseksi ja sovitteluksi. (Lempiäinen & Savolainen 2003) Automaattiset laitteet sen sijaan mukautuvat virheisiin hyvin huonosti, ja siksi osien laadulla on automatisoidussa kokoonpanossa vielä suurempi merkitys kuin käsin suoritettavassa kokoonpanossa. (Andreasen et al. 1988; Lempiäinen & Savolainen 2003) Erityisesti automaattisessa kokoonpanossa tulee välttää osia, jotka takertuvat toisiinsa, sillä niiden syöttäminen on vaikeaa (Boothroyd et al. 2010). Automaattista kokoonpanoa varten suunnittelussa tuotteissa myös komponenttien ei-toiminnallisia mittoja voidaan joutua toleroimaan, jotta esimerkiksi kuljettimet, kiinnittimet ja työkalut toimivat oikein. Toisaalta, usein komponenttien laatuvaatimuksien kasvaessa myös tuotteen laatu kasvaa. (Andreasen et al. 1988)

Roboteilla suoritettavassa kokoonpanossa muodostuu erityisen tärkeäksi osien itsekeskittyvyys. Yhdellä robottikäsiarrella ei voida samanaikaisesti esimerkiksi pitää osaa paikallaan ja asettaa sitä kiinnittävää ruuvia. Osat tulisi myös suunnitella niin, että kaikkiin osiin voidaan tarttua samalla tarraimella, sillä tarraimen vaihtamiseen kuluu aikaa. (Boothroyd et al. 2010)

2.7 Kokoonpantavuuden analysointi

Jotta vaihtoehtoisia ratkaisuja voitaisiin vertailla ja ehdotettujen muutoksien vaikutusta kokoonpantavuuteen arvioida, tarvitaan kokoonpantavuudelle mittareita. Boothroyd et al. (2010) mukaan kokoonpantavuusindeksi lasketaan kaavalla

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

jossa E_{ma} on kokoonpantavuusindeksi, N_{min} teoreettinen osien vähimmäislukumäärä, t_a teoreettinen kokoonpano-aika yhdelle osalle ja t_{ma} tuotteen arvioitu kokoonpano-aika. Osien teoreettinen vähimmäislukumäärä lasketaan käyttäen luvussa 2.3 esitettyä kol-

mea kysymystä osan välttämättömyyden arviointiin. Jos osa ei täytä yhtäkään välttämättömyyden ehtoa, ei osaa lasketa mukaan teoreettiseen vähimmäislukumäärään. Kokoonpanoaikana yhdelle osalle käytetään kolmea sekuntia, joka on keskiarvo osalle, jonka käsittelyssä, paikalleen asettamisessa tai kiinnittämisessä ei ilmene vaikeuksia. (Boothroyd et al. 2010) Tyypillisesti tuotteen kokoonpantavuusindeksi on n. 5 – 10 %, jos tuotteen osia ei ole vähennetty tuotteen kokoonpantavuutta analysoimalla ja lähellä arvoa 25 % jos niitä on vähennetty. Tämä osoittaa, että osien tarpeellisuudelle on käytännössä muitakin ehtoja kuin aiemmin mainittujen kolmen kysymyksen määrittelemät ehdot. (Whitney 2004)

Lucas Corporationin kehittämään DFA metodiin sisältyy suunnittelutehokkuuden (engl. design efficiency) määrittäminen. Suunnittelutehokkuutta laskiessa komponentit jaetaan A- ja B-komponentteihin. A-komponentit ovat primäärikomponentteja, jotka ovat tuotteen kannalta välttämättömiä. B-komponentit ovat sekundäärikomponentteja, jotka eivät ole välttämättömiä, kuten kiinnittimet ja paikoittavat komponentit. Suunnittelutehokkuus lasketaan kaavalla

$$DE = \frac{A}{A + B} * 100 \%, \quad (2)$$

jossa DE on suunnittelutehokkuus, A primäärikomponenttien lukumäärä ja B sekundäärikomponenttien lukumäärä. (Desai et al. 2008) Tavoiteltu suunnittelutehokkuus on vähintään 60 % (Desai et al. 2008; Swift & Booker 2013). Swiftin ja Bookerin (2013) mukaan A- ja B -komponentteihin jakaminen voidaan suorittaa luvussa 2.3 esitettyjen kolmen kysymyksen avulla.

Kokoonpantavuutta analysoidessa on syytä kiinnittää huomiota myös työn fyysiseen kuormittavuuteen. Suurin osa DFA-metodeista keskittyy pienten osien kokoonpanemisen analysointiin, mutta esimerkiksi ajoneuvojen kokoonpaneminen voi käsittää suurten ja raskaiden kappaleiden käsittelyä (Whitney 2004). Ihmisen tuntema fyysinen kuormitus on ajan suhteen logaritminen. Toyota on kehittänyt ajoneuvojen kokoonpanemista vasten TVAL (Toyota Verification of Assembly Line) -metodin. Metodin perusteena on kaava

$$L = d1 * \log(t) + d2 * \log(W) + d3, \quad (3)$$

jossa L on fyysinen kuormitustila, t aika, W kuorma ja $d1, d2, d3$ ovat vakioita. Työn kuormittavuuteen vaikuttavat eniten käsiteltävien kappaleiden massat ja asento, jossa työ

suoritetaan. Koska kaavan ratkaisemiseksi jokaiselle työtehtävälle kuluisi todella paljon aikaa, Toyota on määrittänyt suhdelukuja työtehtävien ja kuntopyörällä tehdyn rasituskokeen välille. (Niimi & Matsudaira 1997) Vaikka työtehtävien fyysisiä kuormituksia ei erikseen tutkittaisi, on suunnittelijan hyvä tiedostaa komponenttien massat, työasennot, sekä mahdollisuudet apuvälineiden käyttöön.

Taulukko 1. Yleisiä suunnitteluohjeita.

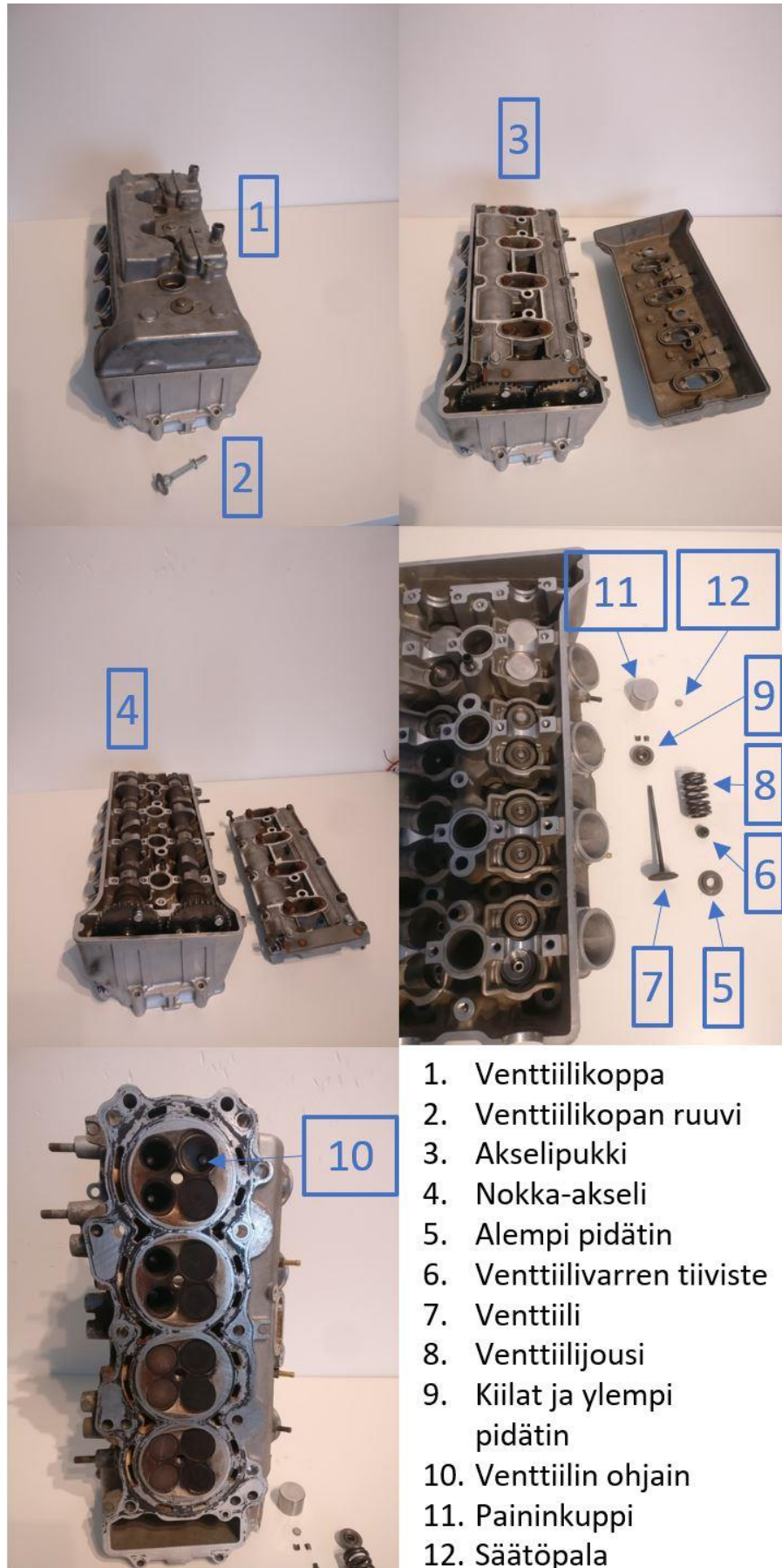
Ohje	Lähde
Pidä osamäärä mahdollisimman pienenä ja integroi osia.	(Andreasen et al. 1988; Niimi & Matsudaira 1997; Boothroyd et al. 2010)
Tee osista symmetrisiä, ja jos tämä ei ole mahdollista, tee osista selvästi epäsymmetrisiä.	(Andreasen et al. 1988; Niimi & Matsudaira 1997; Boothroyd et al. 2010)
Suunnittele osat sellaisiksi, etteivät ne takerru ja juutu toisiinsa.	(Andreasen et al. 1988; Niimi & Matsudaira 1997; Boothroyd et al. 2010)
Vältä osia, jotka ovat liukkaita, hauraita, hyvin pieniä, hyvin suuria tai vaarallisia käsittelijälle (esim. teräviä).	(Boothroyd et al. 2010)
Suunnittele osiin paikalleen asettamista ohjaavia piirteitä.	(Andreasen et al. 1988; Gerhard & Wolfgang 1990; Boothroyd et al. 2010)
Toleroi niin että osien asentaminen ei vaadi paljon voimaa, mutta kuitenkin niin etteivät osat voi kiilautua paikalleen asetettaessa.	(Niimi & Matsudaira 1997; Boothroyd et al. 2010)
Pidä kokoonpanosuuntien määrä mahdollisimman pienenä. Yleensä paras kokoonpanosuunta on ylhäältä alas.	(Niimi & Matsudaira 1997; Boothroyd et al. 2010)
Suunnittele niin ettei osia tarvitse pitää paikallaan, kun kokoonpanoa käsitellään tai muita osia asetetaan paikallensa (itsekeskittyvyys).	(Niimi & Matsudaira 1997; Boothroyd et al. 2010)
Vältä osia, jotka täytyy vapauttaa otteesta (tiputtaa) ennen kuin ne ovat oikealla paikallansa.	(Niimi & Matsudaira 1997; Boothroyd et al. 2010)
Tarjoa kokoonpanoon perusosa, jolla on stabiili asento.	(Andreasen et al. 1988; Boothroyd et al. 2010)
Automaattisia kuljettimia käytettäessä, kiinnitä huomiota orientoituvuuteen ja siihen, ettei osaa tarvitse käännellä asentamista varten.	(Boothroyd et al. 2010)
Pidä huoli, että kokoonpanossa on tilaa asennusoperaatioiden suorittamiselle.	(Gerhard & Wolfgang 1990; Boothroyd et al. 2010)
Vältä tarvetta osien säätämiseksi.	(Boothroyd et al. 2010)
Vältä tarvetta työkalujen käytölle.	(Niimi & Matsudaira 1997)
Vähennä liitososia ja suosi keskenään samanlaisia liitososia.	(Gerhard & Wolfgang 1990)

Taulukossa 1 on esitetty lähdemateriaalista kerättyjä yleisiä suunnitteluohjeita kokoonpanemisen helpottamiseksi. Nämä suunnitteluohjeet kokoavat paljon tässäkin opinnäytetyössä esitettyä tietoa tiiviiseen ja helposti esitettävään muotoon. Suunnitteluohjeet eivät kuitenkaan ole päteviä yksinään käytettäväksi, sillä niiden avulla ei voida arvioida kokoonpantavuutta (Boothroyd et al. 2010). Suunnitteluohjeet voivat vaikuttaa toisiinsa tai joissain tapauksissa jopa kumota toisensa (Gerhard & Wolfgang 1990). Ne voivat kuitenkin auttaa suunnittelijaa löytämään epäkohtia tuotteesta ja löytämään parempia ratkaisuja, joita voidaan sitten arvioida esimerkiksi tässä luvussa aiemmin esitetyillä kokoonpantavuuden mittareilla.

3. MOOTTORIPYÖRÄN SYLINTERIKANNEN DFA-SUUNNITTELU

3.1 Sylinterikannen rakenne ja kokoonpanomyönteisyys

Tässä opinnäytetyössä perehdytään Honda CBR 600 F4 -moottoripyörän 1999 vuosimallin sylinterikanteen. Sylinterikannessa keskitytään lähinnä sylinterikannen runkosaan, venttiilikoneistoon ja sitä peittävään venttiilikoppaan. Sylinterikannen kaikkien osien analysoiminen muodostaisi liian laajan osion tämän opinnäytetyön laajuuteen nähden.



Kuva 6. Sylinterikannen rakenne.

Kuvassa 6 on esitetty sylinterikannen rakenne ja osat, joihin tässä opinnäytetyössä keskitytään. Venttiilikoneistoa peittää venttiilikoppa (1), joka on kiinnitetty sylinterikanteen kolmella ruuvilla (2). Nokka-akseleissa (4) on päädyissä hammaspyörät, sillä niille välitetään käyttövoima ketjuvälityksellä. Nokka-akselit ovat laakeroitu sylinterikannen runko-osan ja akselipukin (3) väliin. Nokka-akselien liike välitetään venttiileille (7) paininkupin (11) avulla. Venttiilijouset (8) vetävät venttiileitä suljettuun asentoon. Venttiilijouset ja sylinterikannen välissä on venttiilijouset alempi pidätin, joka paikoittaa venttiilijouset pään (5). Venttiilijouset pysyvät jännityksessä ylemmän pidättimen ja kiilojen (9) avulla. Paininkupin ja venttiilin pään välissä on säätöpala (12), jolla säädetään paininkupin ja nokka-akselin välinen välyys. Sylinterikanteen on asennettu puristamalla venttiilin ohjain (10), joka toimii laakeripintana venttiilille. Venttiilin ohjaimen ympärillä on venttiilivarren tiiviste (6), joka estää öljyn vuotamisen venttiilin vartta pitkin.

Sylinterikannen kokoonpanosuunta on hyvin yhtenäinen. Kaikki edellä mainitut osat venttiileitä ja nokka-akseleiden rattaita ja kiinnitysruuveja lukuun ottamatta asennetaan suoraviivaisella ylhäältä alaspäin suuntautuvalla kokoonpanoliikkeellä. Venttiilit täytyy asettaa paikalleen vastakkaisesta suunnasta, ja nokka-akseleiden rattaiden kiinnitys on rajoitetun tilan vuoksi helpointa ennen kuin nokka-akselit asennetaan sylinterikanteen.

Paikoittavia piirteitä ilmenee akselipukin, nokka-akselien, venttiilijouset ja venttiilinohjaimien asennuksessa. Runko-osan ja akselipukin välissä sijaitsevat viistetyt ohjainholkit paikoittavat akselipukin runko-osaan. Nokka-akseleissa on olakkeet, jotka sopivat runko-osassa ja akselipukissa oleviin uriin. Nämä olakkeet paikoittavat nokka-akselit pituus-suunnassa. Myös venttiilijouset pidättimissä on olakkeet, jotka sopivat venttiilijouset sisäpuolelle. Lisäksi venttiilinohjaimien päät ovat viistetty.

Runko-osan pohjaan on koneistettu suora pinta, joten sylinterikannella on stabiili asento kokoonpanoa varten. Runko-osaa täytyy kuitenkin käänellä kokoonpanon aikana venttiilien asentamiseksi paikallensa, jos sylinterikannen kokoonpaneminen suoritetaan esimerkiksi pöydällä.

Venttiilijouset kokoonpaneminen vaatii erikoistyökalun, sillä venttiilijousta täytyy puristaa kokoon ennen kuin kiilat voidaan asettaa venttiilin ylemmän pidättimen ja venttiilin väliin. Lisäksi kiilat ovat pieniä ja melko haastavia käsitellä sormin. Niidenkin asentamista nopeuttaisi tarkoitukseen suunniteltu työkalu. Venttiilikopan, akselipukin ja nokka-akseleiden rattaat kiinnittämissä ruuveissa käytetään kaikissa samankokoista kantaa. Teori-

assa ne on siis mahdollista kiinnittää samalla työkalulla, mutta käytännössä mahdollisesti erilaiset kiristysmomentit voivat kuitenkin tehdä erillisistä työkaluista paremman vaihtoehdon.

Sylinterikannessa on melko paljon erilaisia osia, sillä venttiilit, venttiilijouset, venttiilin pidättimet, venttiilin ohjaimet ja nokka-akselit ovat erilaisia sylinterikannen imupuolella ja pakopuolella. Lisäksi venttiilijouset ovat epäsymmetriset pituussunnassa. Venttiilijousiin on merkitty värillä pää, jonka on tarkoitus osoittaa ylöspäin. Näitä kokoonpanemista mutkistavia seikkoja on luultavasti vaikea muuttaa vaikuttamatta sylinterikannen toimintaan.

Lasketaan edellä käsiteltyjen osien yhteenlaskettu lukumäärä, jotta myöhemmin esitettyjen parannusehdotuksien vaikutusta voidaan arvioida.

Taulukko 2. Sylinterikannen osalista.

Komponentti	Lukumäärä
Runko-osa	1
Venttiilikoppa	1
Venttiilikopan kiinnitysruuvit	3
Akselipukki	1
Akselipukin kiinnitysruuvit	20
Akselipukin ohjainholkit	2
Nokka-akselit	2
Nokka-akseleiden rattaat	2
Nokka-akseleiden rattaiden kiinnitysruuvit	4
Venttiilit	16
Venttiilijouset	16
Venttiilijousien pidättimet	32
Kiilat	32
Venttiilien ohjaimet	16
Paininkuppi	16
Säätöpala	16
Venttiilivarren tiiviste	16
Yhteensä:	196

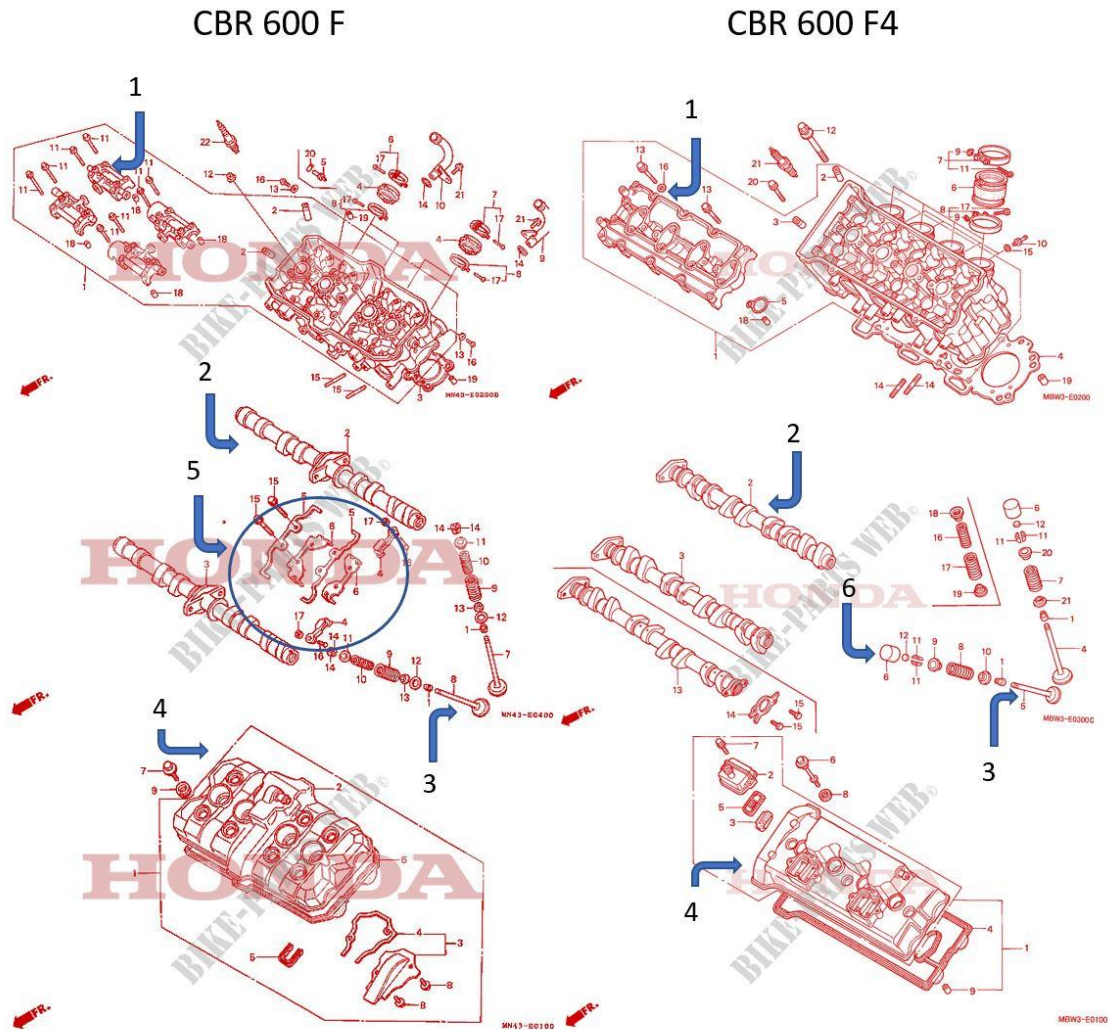
Koska sylinterikannen kokoonpanovaiheisiin kuluvia aikoja on vaikea arvioida, ei luvussa 2.7 esitelty kokoonpanoindeksi ole kovin käyttökelpoinen tässä tapauksessa. Määritetään suunnittelutehokkuus luvussa 2.7 esitellyllä kaavalla 2. Tätä kaavaa varten täytyy määrittää sekundäärikomponentit taulukossa 2 esitetyistä komponenteista. Sekundäärikomponentteja ovat venttiilikopan kiinnitysruuvit, akselipukin kiinnitysruuvit, akselipukin ohjainholkit, kiilat, venttiilijousien alemmat pidättimet, säätöpalat ja nokka-akseleiden rattaisten kiinnitysruuvit. Myös nokka-akseleiden rattaat ja akselipukki ovat sekundääriosia, sillä niiden ei välttämättä tarvitse olla erillisiä osia. Sekundäärikomponentteja on siis yhteensä 80 kappaletta ja primäärikomponentteja 116 kappaletta. Määritetään suunnittelutehokkuus:

$$DE = \frac{116}{116+80} * 100 \% \approx 59 \%$$

Suunnittelutehokkuus on siis hieman tavoiteltua 60 prosentin minimisuunnittelutehokkuutta pienempi.

3.2 Sylinterikannen kokoonpantavuus verrattuna vanhempaan malliin

Rakenteesta voidaan löytää kokoonpanemista helpottavia ja osamäärää vähentäviä ominaisuuksia vertailemalla sitä toiseen samanlaista tarkoitusta varten suunniteltuun rakenteeseen. Tämän sylinterikannen tapauksessa hyvä vertailukelpoinen rakenne on saman mallisarjan vanhempi sylinterikansi. Nyt vertailuun valitaan noin kymmenen vuotta vanhempi Honda CBR 600 F -moottoripyörän 1990 vuosimallin sylinterikansi.



Kuva 7. Sylinterikansien rakenteet. Muokattu lähteestä (HONDA Motorcycles & ATVS Genuine Spare Parts Catalog).

Sylinterikansien rakenne on pääpiirteiltään hyvin samanlainen; Molemmissa on runko-osa, venttiilikoppa (4), yhteensä 16 venttiiliä (3) ja kaksi nokka-akselia (2). Kuvasta 6 kuitenkin havaitaan eroavaisuuksia venttiilikoneistossa. 600 F -mallin sylinterikannessa nokka-akselit käyttävät venttileitä vipujen välityksellä. Tähän rakenteeseen (5) kuuluu yhteensä 10 osaa venttiiliparia kohden. Tämä rakenne sisältää vivut, venttiiliväläyksen säätöruuvit ja lukitusmutterit, sekä ohutmetalliosia, jotka pitävät vivut oikeassa asennossa venttiilien päällä. 600 F4 -mallissa nokka akselit käyttävät venttiileitä paininkupin (6) välityksellä ja venttiiliväläys säädetään kupin ja venttiilin väliin asetetavalla säätöpallalla. Tässä rakenteessa on vain kaksi osaa venttiiliä kohden. 600 F -mallissa siis tarvitaan kolme osaa enemmän nokka-akselin voiman välittämiseksi venttiilille kuin 600 F4 -mallissa. Koska venttiileitä on yhteensä 16, tarkoittaa tämä 48 osan ero lukumäärässä.

Osien määrän vähentäminen monimutkaistaa tässä tapauksessa sylinterikannen runko-osan rakennetta hieman, sillä kupeille (6) täytyy koneistaa sylinterit, joissa ne liukuvat.

Osien määrää on vähennetty myös venttiilikopan (4) ja nokka-akselien (2) kiinnityksessä. 600 F -mallissa venttiilikopan kiinnitykseen käytetään kahdeksaa ruuvia, kun 600 F4 -mallissa vain kolmea. 600 F mallissa nokka-akselit kiinnitetään neljällä erillisellä pukilla (1), kun 600 F4 -mallissa molemmat nokka-akselit kiinnitetään yhdellä osalla (1). Toisaalta 600 F4 -mallissa tämän osan kiinnittämiseen käytetään 20 ruuvia ja 600 F -mallissa 16 ruuvia.

3.3 Sylinterikannen kokoonpantavuuden kehittäminen

Vaikka sylinterikannen kokoonpantavuutta on saatu parannettua merkittävästi edeltäjänsä verrattuna, voidaan sitä edelleen parantaa integroimalla osia ja muuttamalla rakennetta. Kun sylinterikannen osien olemassaolon tarpeellisuutta mietitään luvussa 2.3 esitettyjen kolmen kysymyksen kautta, havaitaan että jotkin osat eivät täytä näitä ehtoja. Kiilojen, akselipukin, venttiilijousien alempien pidättimien ja nokka-akseleiden rattaiden ei teoriassa tarvitse olla erillisiä osia. Kiilat eivät liiku suhteessa venttiiliin tai venttiilijousen ylempään pidättimeen. Nokka-akseleiden rattaiden ei tarvitse olla erillisiä osia nokka-akseleista kokoonpanon onnistumiseksi. Myöskään akselipukin ei tarvitse olla erillinen osa venttiilikopasta.

Käytännössä edellä kuvatut muutokset saattavat kuitenkin aiheuttaa haasteita suunnittelun ja valmistuksen kannalta. Venttiilijousen ylempää pidätintä on haastavaa kiinnittää venttiiliin luotettavasti ilman kiiloja tai muita kiinnittimiä. Nokka-akseleiden rattaiden integroiminen osiksi nokka-akseleita lisäisi koneistuskustannuksia. Akselipukin integroiminen osaksi venttiilikoppaa esittää haasteita paininkupin ja nokka-akselin välisen välyksen mittaamiseksi, sillä sitä ei voi mitata, kun venttiilikoppa on paikallaan. Tämä voitaisiin kuitenkin ratkaista esimerkiksi pitämällä paininkuppi kiinni nokka-akselissa öljynpaineen avulla, jolloin erillisiä säätöpaloja ei tarvittaisi. Jos akselipukki integroidaan osaksi venttiilikoppaa, voidaan kolmesta venttiilikoppaa kiinnittävästä ruuvista luopua.

Tässä luvussa käsiteltujen seikkojen nojalla tehdään sylinterikanteen seuraavat muutokset:

1. Integroidaan alemmat venttiilijousen pidättimet osiksi venttiiliin ohjaimia.
2. Integroidaan nokka-akseleiden rattaat osiksi nokka-akseleita.
3. Integroidaan akselipukki osaksi venttiilikoppaa.

4. Luovutaan säätöpaloista siirryttäessä öljynpaineella toimivaan paininkupin välyksen poistoon.

Sekundääriosista vähennetään nokka-akselien rattaiden kiinnitysruuvit, nokka-akselien rattaat, venttiilikopan kiinnitysruuvit, akselipukki, säätöpalat ja venttiilijousien alemmat pidättimet, jolloin niiden määrä on

$$80 - 4 - 2 - 3 - 1 - 16 - 16 = 38$$

kappaletta. Määritetään uusi suunnittelutehokkuus:

$$DE = \frac{116}{116+38} * 100 \% \approx 75 \%$$

Taulukossa 3 on esitetty komponenttien lukumäärissä tapahtuneet muutokset. Komponentit, joiden lukumäärä on muuttunut, on alleviivattu.

Taulukko 3. Sylinterikannen osalista ennen ja jälkeen muutoksien.

Komponentti	Lukumäärä ennen	Lukumäärä muutoksien jälkeen
Runko-osa	1	1
Venttiilikoppa	1	1
<u>Venttiilikopan kiinnitysruuvit</u>	<u>3</u>	<u>0</u>
<u>Akselipukki</u>	<u>1</u>	<u>0</u>
Akselipukin kiinnitysruuvit	20	20
Akselipukin ohjainholkit	2	2
Nokka-akselit	2	2
<u>Nokka-akselien rattaat</u>	<u>2</u>	<u>0</u>
<u>Nokka-akselien rattaiden kiinnitysruuvit</u>	<u>4</u>	<u>0</u>
Venttiilit	16	16
Venttiilijouset	16	16
<u>Venttiilijousien pidättimet</u>	<u>32</u>	<u>16</u>
Kiilat	32	32
Venttiilien ohjaimet	16	16
Paininkuppi	16	16
<u>Säätöpala</u>	<u>16</u>	<u>0</u>
Venttiilivarren tiiviste	16	16
Yhteensä:	196	154

Muutoksien myötä suunnittelutehokkuus siis nousi 59 prosentista 75 prosenttiin. Lisäksi yhteenlaskettu osamäärä väheni 196 osasta 154 osaan. Analysoimalla osien tarpeellisuutta ja integroimalla osia saavutettiin siis näkyviä parannuksia tuotteen kokoonpantavuudessa. Vähäisemmän osamäärän myötä asennusoperaatioiden määrä pieneni ja kokoonpaneminen nopeutuu. Lisäksi tuotteen huollon tarve vähenee, koska paininkuppien ja nokka-akseleiden välistä välystä ei tarvitse enää säätää tuotteen elinkaaren aikana. Osien eliminoimisen aiheuttamat muutokset kustannuksissa tarvitsevat kuitenkin eri alojen asiantuntijoiden arvioita ennen kuin muutoksien vaikutukset ovat täysin selvät. Vaikka osa kustannuksista väheneekin osien eliminoimisen myötä, voivat valmistuskustannukset nousta joidenkin osien tapauksessa liikaa. Ehdotettujen muutoksien vaikutusta tuotteen suorituskykyyn tulee myös arvioida tarkkaan.

4. YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä onnistuttiin esittämään kattavasti keinoja tuotteen kokoonpanemisen helpottamiseksi. Vaihtoehtoisilla tuoterakenteilla voidaan vähentää osamäärää ja asennusoperaatioiden määrää merkittävästi. Osamäärää voidaan pienentää tutkimalla, onko kaikkien osien olemassaoloon rakenteessa hyvä syy. Mahdollisuuksien mukaan tulee yhdistää monia osia yhdeksi osaksi hyödyntämällä erilaisia valmistusmenetelmiä ja materiaaleja. Mahdollisuuksia osan integroimiseksi osaksi jotain toista osaa tulee tutkia erityisesti, jos osan ei tarvitse olla valmistettu eri materiaalista kuin ympäröivät osat, se ei liiku suhteessa muihin osiin tai sen ei tarvitse olla erillinen osa rakenteen kokoonpanemista ja purkamista varten.

Tuotteen kokoonpantavuutta voidaan parantaa asennusoperaatioiden vähentämisen lisäksi myös tekemällä niistä helpompia suorittaa. Keinot asennusoperaatioiden suorittamiseksi, kuten DFA-periaatteet yleensäkin, ovat hyvin yksinkertaisia ja yleistajuisia. Kuitenkaan suunnittelija ei välttämättä osaa ottaa huomioon kokoonpanemisessa ilmeneviä ongelmia ilman apuvälineitä. Hyvä apuväline on esimerkiksi lista kokoonpanemista helpottavia suunnitteluohjeita, jotka auttavat suunnittelijaa kyseenalaistamaan tekemiensä ratkaisuiden kokoonpanomyönteisyyden.

Sen lisäksi että DFA:n avulla voidaan saavuttaa säästöjä kokoonpanokustannuksissa, voidaan saavuttaa säästöjä myös osien kustannuksissa. Osamäärän väheneminen voi vähentää kokonaiskustannuksia, vaikka yksittäiset osat olisivatkin joissain tapauksissa hieman kalliimpia valmistaa. Valmistusmenetelmien kehityksen myötä monimutkaisten osien valmistamisesta on tullut kannattavampaa kuin ennen. Valmistusmenetelmien valinnassa ja kokoonpanemisiongelmiin huomioimisessa korostuu suunnitteluinsinöörien ja valmistusinsinöörien välisen yhteistyön merkitys.

DFA:n avulla saavutettu tuoterakenteen yksinkertaistuminen voi parantaa myös tuotteen laatua ja huollettavuutta. Yksinkertainen ja helposti kokoonpantava tuoterakenne voi olla myös luotettavampi ja helpommin purettavissa. Varsinkaan jälkimmäinen ei kuitenkaan ole aina totta, sillä osiin integroidut liitokset voivat vaikeuttaa tuotteen purkamista. Myös kierrätys ja komponenttien uudelleen käytettävyys korostaa tuotteiden purettavuuden merkitystä. Tämä tulee ottaa huomioon liitosmenetelmiä valitessa ja osia integroidessa.

Tässä työssä esitettyä teoriaa onnistuttiin soveltamaan hyvin case-tuotteena toimivaan moottoripyörän sylinterikanteen. Tuotteesta löydettiin piirteitä, jotka oli toteutettu kokoon-

panemisen helpottamiseksi. Osia integroimalla saatiin yksinkertaistettua tuotteen rakennetta edelleen ja vähennettyä osamäärää. Kokoonpantavuutta pystyttiin analysoimaan ennen ja jälkeen parannusehdotuksien määrittämällä tuoterakenteen suunnittelutehokkuus. Ehdotettujen muutoksien vaikutusta tuotteen valmistuskustannuksiin ja suorituskykyyn tulisi kuitenkin arvioida ennen muutoksien toteuttamista.

Jotta kokoonpaneminen pystyttäisiin ottamaan huomioon mahdollisimman hyvin tuotteen suunnittelussa, tulisi suunnittelijalla olla mahdollisimman paljon tietoa esimerkiksi erilaisista liitosmenetelmistä, valmistusmenetelmistä ja automaattisen kokoonpanon tuomista vaatimuksista. Edellä mainittuja asioita käsiteltiin tässä opinnäytetyössä vain pintapuolisesti, ja siksi jatkotutkimuksena suunnittelijat voisivat perehtyä omalle alalle relevantteihin menetelmiin syvällisemmin.

Tässä työssä käytetyistä lähteistä ja niiden ensimmäisistä painoksista monet on julkaistu kymmeniä vuosia sitten. Yksi syy tälle on varmasti se, että aihetta käsitteleviä akateemisia kirjoituksia julkaistaan melko vähän (Moultrie & Maier 2014). Monissa tässä työssä käytetyissä lähteissä tuotiin esille yhä uudestaan samoja DFA:ta tutkineita tahoja, eikä monissa kirjoituksissa ollut kovin paljon uutta lisättävää. Tämä kertoo siitä, ettei tuotteen kokoonpantavuuteen liittyen ole kovin paljon uutta löydettävää. Valmistusmenetelmien ja tuotantoautomaation kehitys voi kuitenkin muuttaa alaa hiljalleen.

5. LÄHTEET

- Andreasen, M.M., Kähler, S., Lund, T. & Swift, K. (1988). *Design for Assembly*. IFS Publications. Bedford, UK.
- Booker, J.D. & Swift, K.G. (2003). *Process Selection: From Design to Manufacture*. Butterworth-Heinemann. Oxford, UK.
- Boothroyd, G., Knight, W.A. & Dewhurst, P. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly*. CRC Press. Boca Raton Florida, USA.
- Boothroyd Dewhurst, Inc. verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.4.2020): <https://www.dfma.com/>
- Bryce, D.M. (1997). *Plastic injection molding: material selection and product design fundamentals*. Society of Manufacturing Engineers. Michigan, USA.
- Dalgleish, G.F., Jared, G.E.M. & Swift, K.G. (2000). *Design for assembly: influencing the design process*. Journal of Engineering Design. Vol.11(1), pp.17-29.
- Desai, A., Mital, A., Mital, A. & Subramanian, A. (2008). *Product Development: A Structured Approach to Design and Manufacture*. Elsevier Science & Technology. Amsterdam, Netherlands.
- Eteläaho, P., Ihalainen, P. & Järvelä, P. (1999). *DFA suunnitteluapuvälineenä*. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere, Suomi.
- Gerhard, P. & Wolfgang, B. (1990). *Koneensuunnitteluoppi, suom. Uolevi Konttinen*. Suomen Metallin-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto, MET. Helsinki, Suomi.
- HONDA Motorcycles & ATVS Genuine Spare Parts Catalog, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.4.2020): <https://www.bike-parts-honda.com/>
- Hurst, K., (1999). *Engineering Design Principles*. Butterworth-Heinemann. London, UK.
- Lempiäinen, J. & Savolainen, J. (2003). *Hyvin suunniteltu - puoliksi valmistettu*. Suomen robotiikkayhdistys. Helsinki, Suomi.
- Moultrie, J. & Maier, A.M. (2014). *A simplified approach to design for assembly*. Journal of Engineering Design. Vol.25(1-3), pp.44-63.
- Niimi, A. & Matsudaira, Y. (1997). *Development of a new Vehicle Assembly Line at Toyota: Worker-oriented, Autonomous, new Assembly System*. In: Shimokawa K., Jürgens U., Fujimoto T. (eds) *Transforming Automobile Assembly*. Springer. Berlin, Germany.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. & Grote, K. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer. London, UK.
- Suomen standardoimisliitto (2009). SFS-EN 1005-3 + A1, Koneturvallisuus. Ihmisen fyysinen suorituskyky. Osa 3: koneenkäytön suositellut voimaratat. Helsinki, Suomi.
- Swift, K.G. & Booker, J.D. (2013). *Manufacturing Process Selection Handbook*. Butterworth-Heinemann. Oxford, USA.

Ulrich, K.T. & Eppinger, S.D. (2012). *Product Design and Development*. McGraw-Hill. New York, USA.

Whitney, D.E. (2004). *Mechanical Assemblies - Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. Oxford University Press. New York, USA.