

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

Jarno Volotinen

ILMANVAIHTOKONEEN DFMA: N MUKAINEN UDELLEEN SUUNNITTELU

Työn tarkastajat:

Dosentti Mika Lohtander

Professori Juha Varis

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Jarno Volotinen

Ilmanvaihtokoneen DFMA:n mukainen uudelleen suunnittelu

Diplomityö

2017

90 sivua, 43 kuvaa, 1 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Dosentti Mika Lohtander, Professori Juha Varis

Hakusanat: DFMA, ilmanvaihtokone, uudelleen suunnittelu, Reverse engineering

Tämän diplomityön tarkoituksena on suorittaa DFMA:n mukainen uudelleen suunnittelu kohdeyrityksen ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakenteelle. Tämän vuoksi työssä tullaan määrittelemään tuotesuunnittelussa DFMA:n mukaiset näkökohdat ja toimenpiteet, sekä esitellään ohutlevyteollisuuden yleisimmät valmistusmenetelmät ja mitä niistä tulee huomioida tuotesuunnittelussa. Tärkein anti työssä on ilmanvaihtokoneen ohutlevyrungon kokoonpanon mallintaminen, analysointi, optimisointi ja uudelleen suunnittelu.

Tärkeimpiä tutkimuskysymyksiä työssä ovat, voidaanko ilmanvaihtokoneen uudelleen suunnittelussa käyttää DFMA:n mukaisia näkökohtia ja toimenpiteitä tuotteen optimoimiseksi ja mitä? Tutkimuksen rajauksina toimivat yrityksen toiminnan tuomat tasot, valmistusmenetelmät, kokoonpanomenetelmät ja ilmanvaihtokoneen toiminnallisuuden takaaminen. Uudelleen suunnittelun tuomat uudistukset pyrittiin pitämään niissä rajoissa, jottei yrityksen toiminta muuttuisi radikaalisti.

Uudelleen suunnitellun ilmanvaihtokoneen mallia vertailtiin nykyiseen malliin rakenteellisesti ja määrällisesti. Uudelleen suunnittelun mallista valmistettiin myös prototyyppi, minkä avulla kyettiin vertailemaan kokoonpanonvaiheita toimivuudeltaan ja ajallisesti. Uudelleen suunnittelussa mallissa kyetään säästämään kohdeyrityksen kokoonpanon läpimenoaikaa ja kustannuksia.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Jarno Volotinen

Re-designing of the ventilation unit with DFMA approach

Master's thesis

2017

90 pages, 43 figures, 1 tables, 2 appendices

Examiners: Adjunct Professor Mika Lohtander, Professor Juha Varis

Keywords: DFMA, ventilation unit, re-designing, Reverse engineering

The meaning of this master thesis is to re-design target company's ventilation unit with DFMA approach. That is why in this work there will be defined DFMA viewpoints and actions and there will be presented sheet metal industry's most common manufacturing methods and which matters must be considered in product designing from them. The most valuable asset of this work is the modeling of the ventilation unit, analysis of it, optimization of it and the re-design of the ventilations unit's sheet metal construction.

The most important research questions in this work are, can the DFMA approaches' viewpoints and actions be utilized in the re-designing of the ventilation unit and which one? The levels of the target company's actions, manufacturing methods, assembly methods and the guarantee of the ventilation unit's functionality are the restrictions of this work. The reformations of this re-designing of the ventilation unit were kept in the limits of not changing too much in the activities of the target company.

The model of the re-designing of the ventilation unit were compared to the original model by its structure and quantity. The prototype which was created based on the re-design of the ventilation unit was used to compare the assembly phases' functionality and time consumption. The re-designed model can save target company's assembly lead time and costs.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI -JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	7
1.1	Tutkimuksen taustat, ongelmat, kysymykset ja rajaus	7
1.2	Tavoitteet ja tutkimusmenetelmät	8
1.3	Tieteellinen anti	8
2	VALMISTUS- JA KOKOONPANO YSTÄVÄLLINEN TUOTESUUNNITTELU	9
2.1	DFMA:n käsite ja kehitys	11
2.2	Muita DFMA:han liittyviä käsitteitä.....	16
2.3	DFMA:n näkökohdat ja toimenpiteet	17
2.4	DFMA:n tuomat edut tuotesuunnittelussa	21
3	OHUTLEVYOSIEN SUUNNITTELU DFMA: N NÄKÖKOHDISTA	24
3.1	Ohutlevytuotteiden valmistusmenetelmät.....	25
3.1.1	Ohutlevyjen leikkaaminen	26
3.1.2	Ohutlevyjen muovaus	29
3.1.3	Ohutlevyjen taivuttaminen.....	31
3.1.4	Levytyökeskus	35
3.2	Ohutlevytuotteiden suunnittelusäännöt.....	36
3.2.1	Ohutlevyjen leikkauksen suunnittelu.....	36
3.2.2	Ohutlevyjen muovauksen suunnittelu.....	38
3.2.3	Ohutlevyjen taivuttamisen suunnittelu	39
4	ILMANVAIHTOKONEEN SUUNNITTELUN PIIRTEET	44

4.1	Ilmanvaihtokone	44
4.1.1	Ilmanvaihtokoneen toiminta	45
4.1.2	Ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakenne	48
4.1.3	Ilmanvaihtokoneen valmistus ja kokoonpano.....	50
4.2	Ilmanvaihtokoneen 3D-mallinnus.....	53
5	ILMANVAIHTOKONEEN DFMA: N MUKAINEN UUELLEEN SUUNNITTELU.....	54
5.1	Ilmanvaihtokoneen osakokonaisuuksien ja osien DFMA-analysointi.....	54
5.2	Ilmanvaihtokoneen osakokonaisuuksien ja osien uudelleen suunnittelu.....	55
5.2.1	Ulkokuoren osakokonaisuus ja sen osat	56
5.2.2	Sisäkaton osakokonaisuus ja sen osat	60
5.2.3	Sisäkuoren osakokonaisuus ja sen osat.....	63
5.2.4	Lämmönvaihtimen ympäröivä osakokonaisuus.....	68
5.2.5	Sisäosakokonaisuus 1 & 2	70
5.2.6	Sisäosakokonaisuus 3	74
5.2.7	Sisäosakokonaisuus 4	77
6	UUELLEEN SUUNNITTELUN TULOKSET	79
6.1	Uudelleen suunnitellun mallin prototyyppiosat	81
7	TULOSTEN ARVIOINTI JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET	82
7.1	Tulosten analysointi	82
7.2	Tutkimuksen luotettavuus, mittausmenetelmien osuvuus ja virhetarkastelu.....	84
7.3	Jatkotutkimuskohteet	85
8	YHTEENVETO	86
	LÄHTEET	88
	LIITTEET	
	Liite I: Kriittisyyksien analysointi	
	Liite II: 3D-mallinnetut ja uudelleen suunnitellut osat	

SYMBOLI -JA LYHENNELUETTELO

<i>CAD</i>	Computer-aided design
<i>CAM</i>	Computer-aided design
<i>CE</i>	Concurrent engineering
<i>DFA</i>	Design for assembly
<i>DFC</i>	Design for competitiveness
<i>DFM</i>	Design for manufacturing
<i>DFMA</i>	Design for manufacturing and assembly
<i>DFQ</i>	Design for quality
<i>FEA</i>	Finite element analysis
<i>PDM</i>	Product data management
<i>PLM</i>	Product life-cycle management
<i>RE</i>	Reverse engineering
<i>RP</i>	Rapid prototyping

1 JOHDANTO

Organisaatioiden tulee pyrkiä toiminnassaan optimoimaan oman toimintansa taso, niin että sillä kyetään vastaamaan kilpailullisten markkinoiden vaatimuksiin. Tämän johdosta yritysten tulee olla tietoisia heidän omien tarjoamiensa tuotteidensa tasosta. Kyetäänkö olemassa olevien markkinoiden tasoon vastaamaan ja onko tuotteemme kilpailukykyinen ajankohtasilla markkinoilla. Parantamiseen tulee aina pyrkiä ja siksi on tärkeää optimoida oma tuotteen kilpailulliselle tasolle. (Nasr & Kamrani 2007, s. 3–4.) Tuotesuunnittelu alkaa markkinoiden analysoimiselle ja siinä pyritään etsimään markkinoiden tarve tai mahdollisuus. Tämän jälkeen tuotesuunnitteluprosessin kriittinen vaihe on itse suunnitteluvaihe. Suunnittelu voi yksistään määrätä tuotteen menestymisen kilpailullisilla markkinoilla ja sen takia siihen tulee panostaa. Tuotesuunnittelu vaikuttaa koko organisaation toimintaan kaikilla tasoilla. (Nasr & Kamrani 2007, s. 31–60.)

1.1 Tutkimuksen taustat, ongelmat, kysymykset ja rajaus

Tämän tutkimuksen tarve tuli kohdeyritykseltä. Tutkimuksen tarkoituksena on uudelleen suunnitella yrityksen ilmanvaihtokoneen ohutlevyosista koostuva rakenne, joka on ollut nykyisessä mallissaan jo pitkän aikaa. Tutkimuksen ilmanvaihtokoneen uudelleen suunnittelussa tutkitaan, kyetäänkö ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakennetta optimoimaan valmistus- ja kokoonpanoystävällisen tuotesuunnittelun (Design for manufacturing and assembly, DFMA) näkökohdilla ja toimenpiteillä. Ilmanvaihtokoneen uudelleen suunnittelu suoritetaan takaisinmallinnuksen (Reverse engineering, RE) periaattein. Takaisinmallinnuksessa valmis tuote mallinnetaan ensin ja sen jälkeen osia, sekä kokoonpanoja tullaan analysoimaan, niiden toiminnallisuuden ja kriittisyyden suhteen. Ilmanvaihtokoneen uudelleen suunnittelussa tarkastellaan siis osien kriittisyyttä, kokoonpantavuutta ja valmistettavuutta. Näiden asioiden pohjalta optimoidaan ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakenne.

Ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakenteen optimoinnilla pyritään edesauttamaan yrityksen toimintaa, jonka keskeisimpinä toimintoina ilmanvaihtokoneen valmistuksessa on sen kokoonpaneminen. Suurimman osan tuotteen osista kohdeyritys alihankkivat ja heidän tiloissaan suoritetaan vain vähän osien valmistusprosessia. Varsinaisia muutoksen

kriittisimpiä kohteita ovat tuotteen sisäkaton valmistamisen ja suunnittelun uudelleen suunnittelu, sekä niitti kiinnikkeiden korvaavien menetelmien etsiminen kokoonpanoon. Osakokoonpanossa suoritetaan myös osien yksinkertaistamista, yhdistelyä, symmetrisointia kiinnikkeiden vähentämistä ja valmistusmetodien harkintaa yrityksen sallimissa rajoissa. Uudelleen suunnittelussa kyetään pysymään rajoituksissa, joita olivat ilmanvaihtokoneen toiminnallisten ominaisuuksien ja ulkokuoren mittojen säilyttäminen entisellään.

1.2 Tavoitteet ja tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen tarkoituksena on kartoittaa DFMA:n käsite ja nykytila lukijalle. Kartoittaminen on suoritettu kirjallisuuskatsauksella. Työn tärkeimpänä tavoitteena on suorittaa DFMA:n mukainen analysointi ja optimointi yrityksen ilmanvaihtokoneelle, yhteistyössä yrityksen kanssa, heidän halujensa mukaisesti. DFMA:n mukaisessa analysoinnissa käytetään apuna Lucaksen luomia DFMA:n analysointi menetelmiä. Uudelleen suunnittelussa on pyritty kuulemaan yrityksen toiveita tulevista muutoksista. Takaisinmallinnus on suoritettu SolidWorks- ohjelmistolla, yrityksen lähettämästä kootusta ilmanvaihtokoneesta, sekä sen irrallisista ohutlevyosista. Uudelleen suunnittelun tavoite on luoda ilmanvaihtokoneesta malli, jolla kyetään optimoimaan ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakenteen valmistus ja kokoonpano.

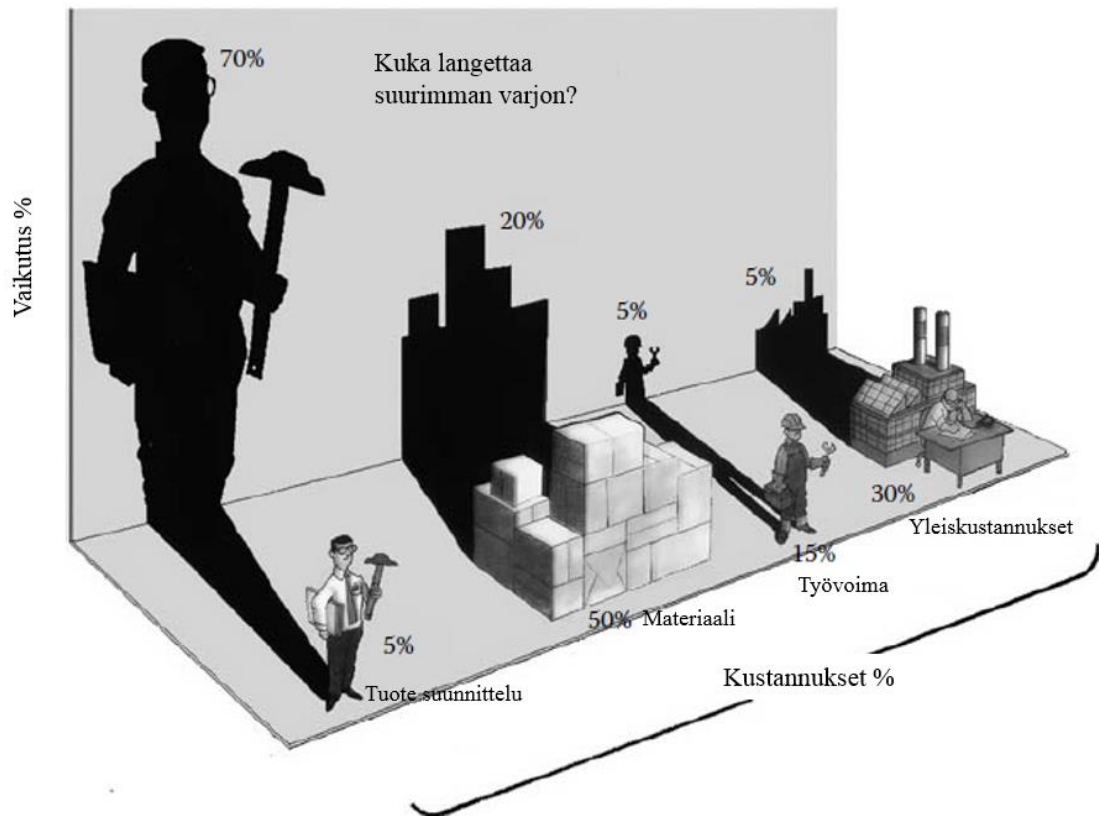
1.3 Tieteellinen anti

Työssä tullaan esittelemään ohutlevyteollisuuden yleisimmät valmistusmenetelmät ja näiden valmistusmenetelmien huomioitavat seikat tuotteiden suunnittelussa. Tutkimuksessa tullaan esittelemään DFMA mukaisen uudelleen suunnittelun, ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakenteen analysointi ja optimointi. DFMA:n tärkeimmät näkökohdat ja toimenpiteet on kartoitettu työssä. Työssä käytetään DFMA:ta tutkineiden analysointimenetelmiä, näkökohtia ja toimenpiteitä. Työssä ei varsinaisesti luoda mitään uutta tieteellisesti, vaan sovelletaan, sekä hyväksi käytetään jo valmiiksi olemassa olevaa tietoa, yrityksen tuotteen parantamiseen. Kohdeyritykselle pyritään luomaan DFMA tutkimuksien mukainen hyöty tuotesuunnittelussa.

2 VALMISTUS- JA KOKOONPANO YSTÄVÄLLINEN TUOTESUUNNITTELU

Organisaatioilla on useita eri toimintoja, joita sen tulee suorittaa tuotekehityksen elinkaaren aikana. Näitä organisaation toimintoja ovat esimerkiksi markkinointi, tutkimustyö, suunnittelu, valmistus ja laatutarkastus. Kuitenkin kaikki yrityksen toiminta lähtee liikkeelle syntyneestä tarpeesta tai mahdollisuudesta. Tuotekehitys lähtee liikkeelle tämän tarpeen tai mahdollisuuden identifioinnista. Minkälainen tuote pystyy vastaamaan organisaation markkinoilla esiintyvään tarpeeseen. Tämän kysymyksen ja tarpeen tai mahdollisuuden täydentämisen vuoksi tuotekehityksen elinkaaren yksi tärkeimmistä vaiheista on tuotteen suunnitteluprosessi. (Nasr & Kamrani 2007, s. 3–4.)

Tuotteen suunnittelun vaihetta voidaan pitää yhtenä kaikista tärkeimmistä tuotteen elinkaaren vaiheista, koska jo pelkästään suunnittelu voi määrittää koko tuotteen menestymisen kilpailullisilla markkinoilla. Toisena suurena tekijänä tuotekehityksen vaiheista pidetään valmistusta, jonka tuloksena on jo valmis tuote, josta tulee enää laatu tarkistaa. Mikäli tuotteen suunnittelu on ollut huonoa, ei minkään tasoinen valmistamisprosessi tule pelastamaan tuotetta ja tuotetta, jota ei kyetä ajattelemaan valmistuksen kautta on huonosti suunniteltu tuote. Tämä voidaan ajatella myös toisin päin, eli valmistusprosessi ei voi olla tehokas ilman huolellista suunnittelua ja toteutusideaa. Vaikka tuote on hyvin suunniteltu, tulee vielä kyseenalaistaa sen valmistuksen tehokkuus. (Nasr & Kamrani 2007, s. 60.) Suunnittelu vaiheen on todistetusti muodostavan 60–80% tuotteen lopullisista kustannuksista (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 8; Hidahl 2002, s. 69; Suresh, Ramabalan & Natarajan 2016, s. 109). Kuvassa 1 nähdään kuinka suuri vaikutus suunnittelulla voi olla prosentuaalisesti koko tuotteen syntyviin kustannuksiin Boothroydin, Dewhurstin ja Knightin (2011) näkemyksen mukaan.



Kuva 1. Eri tekijöiden vaikutus tuotteesta syntyviin kustannuksiin muok. (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 8).

Vaikka tuotteen valmistaminen alkaa suunnittelijan luomista tuotesuunnitelmista ja pätevän suunnittelijan tulisi ottaa tuotteen valmistaminen huomioon suunnittellessa, on tilanne valitettavasti usein se, että suunnittelun ja valmistuksen työryhmiä pidetään erillisinä osastoina organisaatioissa (Nasr & Kamrani 2007, s. 60.). Perinteinen lähtökohta suunnittelijoilla onkin ollut ”me vain suunnittelemme sen ja te rakennatte sen”. Tällainen ajattelu on synnyttänytkin näkymättömän seinän, suunnittelijoiden ja valmistajien välille, jonka yli suunnittelijat heittävät suunnitelmansa valmistajille, jotka joutuvat pärjäämään syntyvien valmistusongelmien kanssa, joita ei otettu huomioon laisinkaan suunnittelussa (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 7–8.) Kun suunnittelijat eivät ota huomioon valmistusteknisiä asioita suunnitelmissaan ja valmistushenkilöstön tulee miettiä, kuinka tuote on mahdollista valmistaa näistä suunnitelmista, mutta mitä tulee kuitenkin muuttaa, menee tuotteen suunnitteluun paljon aikaa hukkaan, kun suunnittelijat ja valmistajat muokkaavat suunnitelmia molempia osapuolia tyydyttäväksi. (Nasr & Kamrani 2007, s. 60; Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 7–8.)

Tuotteiden valmistettavuutta ja tuotteistamista pidetään tärkeänä teollisuudessa. Tämä ajatus on johtanut myös siihen, että suunnittelijoiden on odotettu ottavan huomioon suunnitteluvaiheessa mahdolliset syntyvät valmistustekniset ongelmat. Suunnittelijan tulisi tiedostaa mihin organisaation valmistus kykenee tai kuinka paljon kustannuksia syntyy suunnitelmien toteuttamisesta. Tämän johdosta on kehitelty suunnittelijoille periaatteita, jotka voidaan sitoa yhden käsitteen alle ja se on valmistus- ja kokoonpanoystävällinen tuotesuunnittelu (Design for Manufacturing and Assembly, DFMA). (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 1–8).

2.1 DFMA:n käsite ja kehitys

DFMA:lla tarkoitetaan valmistus- ja kokoonpanoystävällistä tuotesuunnittelua. DFMA käsite on kehittynyt kahdesta alkujaan erillisestä käsitteestä. Kokoonpanoystävällisestä tuotesuunnittelusta (Design for assembly, DFA) ja valmistusystävällisestä tuotesuunnittelusta (Design for manufacturing, DFM). DFMA-työkalujen tarkoitus on taata tuotesuunnittelijoille vaaditut informaatiot ja osaamisen, jolla kyetään takaamaan optimaalinen tuotesuunnittelu prosessi organisaation sisällä (Hidahl 2002, s. 69). Organisaation DFMA:n toteuttamiseen on monia metodeja ja eri tasoja. Suunnittelijan tulee taata, että hänen tuottamansa suunnitelmat on funktionaalisia, kohtuullisia ja valmistettavissa organisaation järjestämän DFMA menetelmiin turvautuen. (Harik & Sahmrani 2010, s. 701–702).

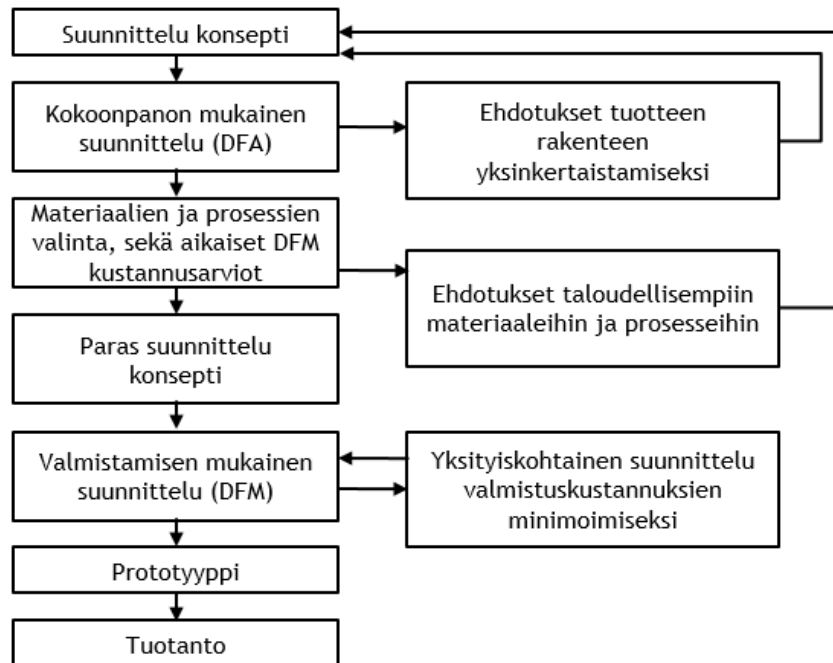
Ennen 1970-lukua tuotteiden osien ja kokonaisuuksien valmistettavuutta ei kyetty mittaamaan määrällisesti. DFMA:n kehittyminen alkoi automaattisen kokoonpanon tutkimuksesta, josta syntyi käsikirja 1970- luvun alussa, missä ohjeistetaan pienten osien syöttämis- ja suuntaustekniikoista. Tämä tutkimus alkoi vuonna 1963 Englannissa Salfordin yliopistossa Geoff Boothroydin johdolla ja jatko-opiskelijan Alan Redfordin avustuksella. Tutkimukset jatkuivat Massachusettsin yliopistolla edelleen Geoff Boothroydin johdossa, mutta mukaan tulivat hänen kollegansa Corrado Poli ja Laurence Murch. Tästä tutkimuksesta muodostuikin automaattisen kokoonpanon suunnittelun metodi. Myöhemmin Boothroyd halusi laajentaa tutkimuksiaan valmistusystävällisen tuotesuunnittelun parissa, kollegansa Bill Wilsonin kanssa. Koko tutkimuksen tarkoitus oli luoda analyttinen ohjekirja suunnittelijoille, joka mahdollistaisi valmistus- ja kokoonpanoystävällisen tuotesuunnittelun. Boothroyd itse keskittyi tutkimuksissa kokoonpanoystävällisen

tuotesuunnittelun kehittämiseen edellisten tutkimuksien tuloksien pohjalta. Bill Wilson keskittyi tutkimuksessa osien valmistusmateriaali ja -prosessi valintoihin alkupään suunnittelun vaiheessa. Tutkimuksen kolmannessa vaiheessa apuun tuli Winston Knight Oxfordin yliopistosta. Hän auttoi kappaleiden valmistusystävällisen tuotesuunnittelun kehittämisessä. 1980-luvulla Boothroydin tutkimukset jatkuivat käsitellen aikaisia kustannusarvioita tuotesuunnittelussa ja tässä tutkimuksessa olivat mukana Peter Dewhurst, sekä Knight. Ulosantina heidän urauurtavassa tutkimuksessaan oli DFA käsikirja, sekä Toolkit ohjelmistotyökalu (Bettles 1992, s. 316). Joten voidaan sanoa, että kokoonpanostävällinen tuotesuunnittelu (Design for assembly, DFA) ja valmistusystävällinen tuotesuunnittelu (Design for manufacturing, DFM) syntyivät näiden tutkimuksen pohjalta. Näistä kahdesta myöhemmin muodostui yhtenäinen kokonainen käsite DFMA. (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 1–4).

Boothroydin ja Dewhurstin tunnettujen tutkimuksien pohjalta syntyi toinen tunnettu DFMA:n mukainen metodi, jonka kehitti Lucas yhteistyössä Hullin yliopiston kanssa 1980-luvulla. Koska Lucaksen DFA metodi pohjautuu Boothroydin ja Dewhurstin tutkimuksiin löytyy metodeista samankaltaisuutta. Molemmissa metodeissa pyritään osien vähentämiseen ja analysoimaan osien geometriat asennusprosessissa. Nämä kaksi metodologiaa ovat ensimmäisiä suunnittelumetodeja, joissa pyritään huolellisen analyysin kautta kohdentamaan osien funktionaalisuudet ja geometriat. (Biesek & Ferreira, 2016, s. 707–708).

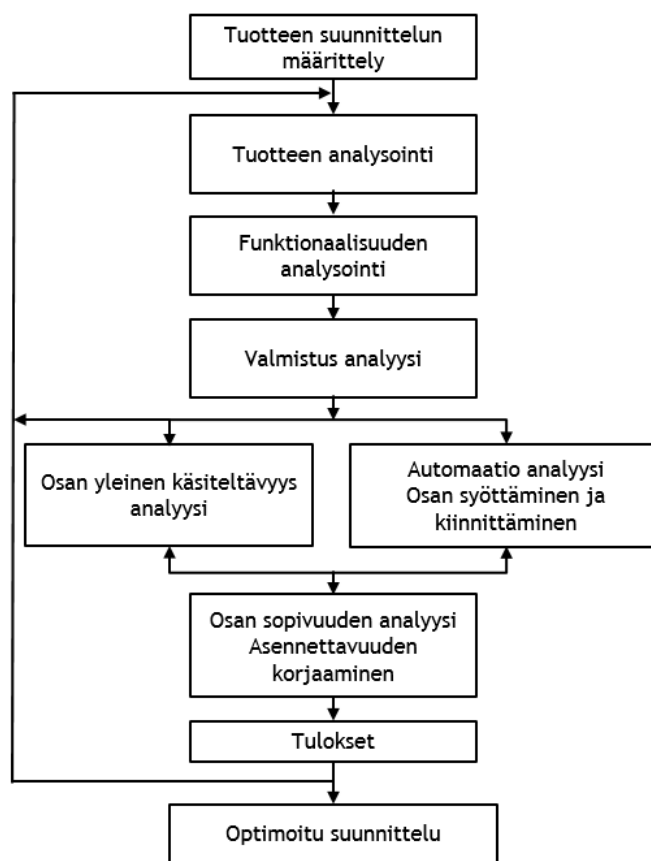
Boothroydin ja Dewhurstin DFMA:n mukaisessa tuotesuunnittelussa otetaan ensimmäisen huomioon (DFA) kokoonpanon mukainen suunnittelu, jossa pääideana on suunnitella tuote kokoonpanon helpottamisen kautta. DFA:n mukaisessa suunnittelussa pyritään siihen, että tuotteen rakennetta yksinkertaistetaan ja se johtaa osien vähentämiseen kokoonpanosta. Mutta pelkän DFA:n käyttäminen tuotesuunnittelussa voi johtaa vähennettyihin osiin sen kustannuksella, että syntyy monimutkainen ja vaikeasti valmistettava osa. Tämä tilanne johtaa kustannusten kasvuun, joka on DFMA:n ideologian vastainen tapahtuma. Jotta osien valmistuskustannukset eivät nouse liian korkeaksi on tuotesuunnittelussa otettava huomioon myös DFM:n mukainen suunnittelu (Harik & Sahmrani 2010, s. 702.) DFM:n avulla valitaan tuotteen materiaalit ja prosessit, joiden avulla saadaan valmistuskustannukset, sekä tuotteen elinkaari minimiin. DFM:n tuotesuunnittelu vaiheessa tulee kuunnella valmistushenkilöstön mielipiteitä, sekä neuvoja kuinka tuote saadaan kaikista tehokkaimmin valmistettua.

DFMA:n mukaisessa tuotesuunnittelussa yhdistyvät DFA ja DFM näkökohdat, sekä toimenpiteet. Kuvassa 2 voidaan nähdä Boothroydin kirjassa (2011) esittämä DFMA:n mukainen tuotesuunnitteluprosessi, jossa on huomioitu niin valmistus- ja kokoonpanoystävällisyys. (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 1–14).



Kuva 2. Boothroydin ja Dewhurstin esittämä DFMA:n mukainen tuotesuunnittelun eteneminen muok. (Biesek & Ferreira 2016, s. 707).

Lucaksen DFA metodissa on luotu järjestys, jonka avulla suoritetaan tuotteen, funktionaalisuuden ja valmistuksen analysointi. Sen tarkoituksena on laajentaa Boothroydin ja Dewhurstin aloittamaa tuotteen analysointia, joka laajentaa suunnittelijoiden huomioon ottamat asiat tuotteensuunnittelussa. Tämän analysoinnin avulla pyritään optimoimaan tuotesuunnittelun tehokkuus. Kuvassa 3 nähdään Lucaksen DFA metodin mukainen tuotesuunnittelun analysointi ketju, joka tulee suorittaa tuotesuunnittelua optimoidessa. (Biesek & Ferreira 2016, s. 707).

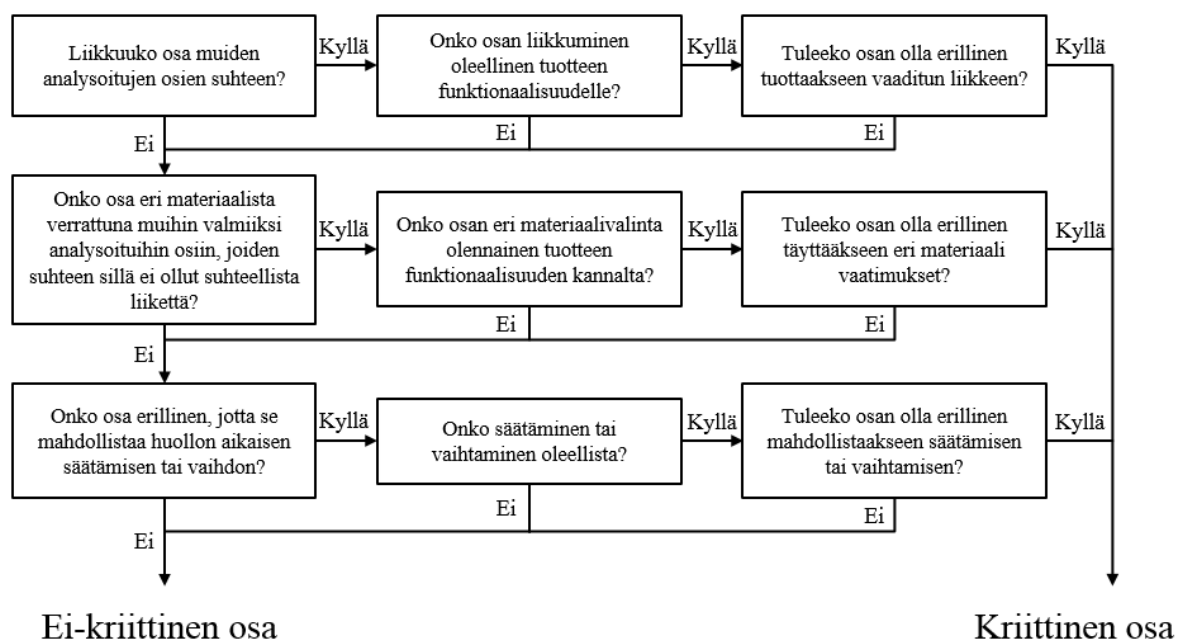


Kuva 3. Lucaksen mukainen DFMA-analyysi tuotteille muok. (Biesek & Ferreira 2016, s. 707).

Boothroydin ja Dewhurstin menetelmässä tuotteiden osien funktionaalisuuden analysointia pyrittiin miettimään kolmen erittelevän kysymyksen avulla. Näitä kysymyksiä miettimällä kyetään arvioimaan, onko osa rakenteessa kriittinen vai kyetäänkö se integroimaan tai kokonaan poistamaan tuotteesta. Ensimmäisenä tulee miettiä, liikkuuko osa kokoonpanossa. Toisena mietittävänä on se, että tuleeko osa valmistaa eri materiaalista, kuin muut osat. Kolmanneksi tulee miettiä, vaaditaanko osaa rakennetta kootessa tai purkaessa. Jos näihin kolmeen kysymykseen vastaukset ovat ei, se voi tarkoittaa sitä, ettei osa ole välttämättä kriittinen kokoonpanossa. Tämä on yksinkertainen Boothroydin esittämä lähestyminen osan kriittisyyttä ja funktionalisuutta kohtaan. (Hidahl 2002, s. 69; Biesek & Ferreira 2016, s. 707–708)

Lucaksen luomassa DFA metodissa, viedään Boothroydin ja Dewhurstin osan kriittisyyden arvioiminen kysymyksillä vielä askeleen edemmäksi. Lucaksen metodin vuokaaviossa on esitetty lisää kohdentavia kysymyksiä tuotteen funktionaalisuudesta tuotteen rakenteessa.

Alkukysymykset tuotteen liikkumisesta kokoonpanossa, materiaalista ja huoltotoimenpiteistä ovat käytännössä samat, mutta sen jälkeen tulee kunkin kysymyksen jälkeen esittää täsmentäviä jatko-kysymyksiä. Boothroydin ja Dewhurstin menetelmässä, kuitenkin pohdittiin tuotteen osien funktionaalisuutta ja kriittisyyttä, jonka tuloksen kyetään saamaan samat vastaukset kuin Lucaksen metodissa. Kuvassa 4 nähdään tarkemmin, minkälaisia jatko-kysymyksiä Lucaksen metodin vuokaaviossa on esitetty, jotta kyetään määrittelemään osien kriittisyyttä tuotteiden rakenteissa. (Biesek & Ferreira 2016, s. 707–708.) Lucaksen metodia tullaan soveltamaan myös tämän työn osien funktionaalisuuden analysoinnissa.



Kuva 4. Lucaksen vuokaavio osien kriittisyyden tarkasteluun tuotteen rakenteessa muok. (Biesek & Ferreira 2016, s. 708).

DFA: ja DFM:n saadessa paljon huomiota ja menestystä alkoi muidenkin ”Design for X” tyylinen tuotesuunnittelu metodien kehittyminen. 1990-luvun lopun jälkeen on valmistus teollisuuden piirissä esiintynyt useita erilaisia ”Design for X” metodeja, joissa tuotesuunnittelussa otetaan huomioon useita erilaisia näkökulmia. (Kuo, Huang & Zhang 2001, s. 241). Esimerkkeinä kyetään mainitsemaan laatu ystävällinen (Design for quality, DFQ), kilpailukyky ystävällinen (Design for competitiveness, DFC) ja luotettavuus ystävällinen tuotesuunnittelu, joilla kaikilla pyritään luomaan tuotesuunnittelu, joka vastaa näiden näkökulmien haasteisiin. (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 17–18.) Varsinkin

ympäristön luomat haasteet ovat luoneet aivan uudenlaiset tuotesuunnittelu menet, kuten ympäristöystävällinen, kierrätys ystävällinen ja tuotteen elinkaari ystävälliset tuotesuunnittelut. (Kuo, Huang & Zhang 2001, s. 241).

2.2 Muita DFMA:han liittyviä käsitteitä

DFMA:n keskeisimpiä käsitteitä on tuotesuunnittelun suunnitteluvaihe, joka toteutetaan nykyään melkein täysin tietokone avusteisesti (Computer aided design, CAD). CAD mallinnuksessa toteutetaan tuotteiden suunnittelu, joko kaksiulotteisesti (2D) tai kolmiulotteisesti (3D). Tietokone avusteinen tuotekehitys ei rajoitu pelkästään suunnitteluun vaan nykyään voidaan tietokone avusteisesti myös suorittaa rajallinen elementtianalyysi (Finite element analysis, FEA) ja valmistusprosessin simulointi (Eskelinen 2013, s. 11–12). Itse valmistus prosessitkin ovat tietokone avusteisia (Computer aided manufacturing CAM), joten suunnitelmien luominen, testaaminen, simulointi, siirtäminen valmistuslaitteistolle ja valmistus kaikki onnistuvat tietokone avusteisesti. DFMA:ta tukevat tietokone avusteiset työkalut ovat tärkein tutkimuksen kohde kehittyvällä alalla. Kilpailullisessa teollisuudessa DFMA:ta yhdistetäänkin tuottavuuden kasvattamiseksi tuotteen elinkaaren hallinta (Product life-cycle management, PLM) järjestelmien osaksi ja joustavassa tuotannossa tuotetiedon hallinta (Product data management, PDM) järjestelmiin. (Eskelinen 2013, s. 19; Nasr & Kamrani 2007, s. 5–6).

DFMA:n kehittyessä on huomioitu myös, ettei pelkät organisaation tekniset, eli suunnittelun ja valmistuksen näkökulmat tuotekehityksessä eivät riitä yksikseen. Vaan huomioon tulee vielä ottaa organisaation liiketoiminnalliset seikat, kuten markkinoiden analysointi ja tuotteen markkinointi. Tätä teknisen ja liiketoiminnallisen osaamisen yhdistämistä organisaatioissa on kutsuttu rinnakkaissuunnitteluksi (Concurrent engineering, CE). Rinnakkaissuunnittelulla pyritään kasvattamaan tietoutta markkinoiden kehitymisestä tuotesuunnittelussa ja tätä myötä kasvattaa tuotteen kilpailukykyä markkinoilla. (Eskelinen 2013, s. 12–13).

Kun tuotetta halutaan uudelleen suunnitella, muokata, uudelleen käyttää toisessa tarkoituksessa tai mallintaa prototyyppiä varten on hyödyllinen lähestymistapa käänteinen suunnittelu (Reverse engineering, RE). Tällaisessa lähestymisessä yleensä on niin, että valmiin fyysisen tuotteen geometriat tulee mallintaa 3D-CAD muotoon, josta näitä malleja

tullaan kehittämään CAD-suunnitteluohjelmistoilla. Käänteisen suunnittelun apuna kyetään käyttämään nopeaa prototyypausta (Rapid prototyping, RP), jonka avulla voidaan nähdä nopeat muutokset rakenteissa fyysisessä mallissa. (Eskelinen 2013, s. 8–10; Nasr & Kamrani 2007, s. 5–6).

2.3 DFMA:n näkökohdat ja toimenpiteet

Valmistus- ja kokoonpanoystävällisen tuotesuunnittelun tarkoituksena on ohjeistaa tuotesuunnittelijoita suunnitteluprosessin aikana. DFMA metodilla pyritään luomaan organisaatioille suunnittelu konsepti, jolla kyetään luomaan yksinkertaisen konfiguraatio organisaation tuotteesta. DFMA koostuu yksinkertaisista näkökohdista ja toimenpiteistä, jotka ottavat huomioon tuotteen valmistuksen ja kokoonpanon, sekä minimoivat suunnitelmien muuttamisen myöhemmissä valmistusprosessin vaiheissa. Seuraavissa kappaleissa tullaan esittelemään DFMA:n ideologiaa sen näkökulmien kautta ja samalla mitkä toimenpiteet toteuttavat näitä näkökulmia. (Hidahl 2002, s. 69).

Yksinkertaistaminen on yksi DFMA:n perinteisistä näkökulmista. Yksinkertaistamista pyritään suorittamaan DFMA:n kautta aina, kun se on mahdollista, järkevää ja valmistusystävällistä. Yksinkertaistamisessa tulee miettiä, ovatko yksittäiset osat kriittisiä tuotteen rakenteessa. Kriittisellä osalla tarkoitetaan tuotetta, jota ei kyetä korvaamaan tai yhdistämään toiseen osaan tuotteen rakenteessa ja on näin funktionaalisesti kriittinen. Boothroyd ja Dewhurst analysoi osien funktionaalisuutta ja kriittisyyttä esittämällä, jokaisen osan kohdalla kolme kysymystä, niin kuin aiemmin tässä työssä on esitelty. Lucaksen DFA metodissa funktionaalisuutta ja kriittisyyttä määritettiin kuvan 4 vuokaavion mukaisen kysymys ketjun avulla. Yksinkertaistaminen on yksi DFA metodien tärkeimmistä näkökohdista. (Hidahl 2002, s. 69).

Yksinkertaistamisen toimenpiteitä ovat osien vähentäminen, kiinnikkeiden vähentäminen, monitoimisten osien käyttäminen rakenteessa, osien uudelleensuuntausten vähentäminen valmistusvaiheessa ja modulaaristen kokoonpanojen hyödyntäminen. Osien vähentäminen tuotteissa suoritetaan osien funktionaalisuuden ja kriittisyyden analysoinnin kautta. Osa kyetään eliminoimaan tuotteen rakenteesta yhdistämällä muiden osien funktionaalisuuteen. Kiinnikkeet eivät ole osakokonaisuuksissa yleensä kriittisiä, koska nykyään kyetään valmistamaan tuotteita kiinnikkeillä, jotka eivät tuo lisäosia kokoonpanoon. Kiinnikkeiden

ja osien yhdistämisen suunnittelussa tulisi myös välttää ylimääräisten osien luominen. Kuitenkin tulee kiinnikkeiden kriittisyyttä käsitellä miettien tuotteen funktionaalisuuden kautta ja huonontaako kiinnikkeiden mallin vaihtaminen tai poistaminen tuotteen toiminnollisuutta. Mikäli osa määritellään kriittiseksi tuotteen funktionaalisuuden kannalta, tulee miettiä mitä funktioita osalla on ja voidaanko osalla suorittaa enemmän funktioita. Jokaisen funktionaalisen osan kohdalla tulisi harkita voidaanko osasta tehdä monitoiminen osa, joka voi korvata, jonkun toisen funktionaalisen osan integroimisen kautta. (Hidahl 2002, s. 69).

Yksinkertaistamista ei tulisi toteuttaa tuotesuunnittelussa pelkästään tuotteessa vaan myös valmistuksen ja kokoonpanon vaiheissa. Valmistuksessa tulisi pyrkiä minimoimaan valmistus menetelmien ja vaiheiden määrää. Valmistuksen suunnittelussa tulisi myös suosia ennalta tunnettuja menetelmiä, vähiten uudistuksia tai opettelua vaativia menetelmiä ja valmistuksen vaiheiden uudelleen käyttämistä samassa tuotteessa. Kokoonpanoa suunnitellessa yksi yksinkertaistamisen keino on suunnitella tuote kokoonpantavaksi yhdestä suunnasta. (Hidahl 2002, s. 69.). Yksinkertaisemmassa osien suunnittelussa tulisi harkita myös symmetrisiä tai liioitellusti epäsymmetrisiä osia. Symmetrisyydellä varmistetaan, ettei osaa voida asentamaan kokoonpanon vaiheessa väärin päin tai, jos tuotteesta on mahdollisesti peilikuvallinen versio, niin symmetrinen osa voidaan vaihtaa suoraan tällaiseen kokoonpanoon. Liioitellulla epäsymmetrisyydellä pyritään siihen myös, että kokoonpano helpottuu tällä osalla, koska osasta nähdään tällöin selvästi missä asennossa osa tulee asentaa, kun kokoonpano ohjeet ovat selkeät. (Kuo, Huang & Zhang 2001, s. 244–245).

Viimeisenä yksinkertaistamisen keinona tulisi tuotteen rakenteeseen luoda modulaarisia osakokonaisuuksia, joiden asentaminen ja korvaaminen tarvittaessa olisivat helppoa. Tämä saattaa lisätä tuotteen osa määrää. Mutta, jos organisaation sisällä on tuoteperheitä, joihin moneen erituotteeseen kyettäisiin asentamaan samanlainen modulaarinen osakokonaisuus, helpottaisi se huomattavasti tuotteiden valmistamista ja huoltamista. (Hidahl 2002, s. 69).

Toinen DFMA:n perinteisistä näkökulmista on standardisoiminen. Suurien organisaatioiden sisällä toimittaessa tulisi kaikkien toimia yhteneväisten standardien sisällä. Standardisoimisen keinoja kyetään toteuttamaan organisaation sisällä käytetyissä

materiaaleissa, komponenteissa, tuotteen suunnittelussa ja valmistamisessa. Standardisoinnilla mahdollistetaan organisaation sisäinen yhtenäinen valmistaminen ja suunnitteleminen. Suunnittelussa tulisi standardisoida komponentit, lineaariset ja kulmamitat, suunnitteluprosessit, sekä tuotteiden geometriat. Suunnitellessa tulisi myös huomioida valmistuksen standardisoinnit, joita ovat materiaalit, käytettävät työkalut, pinnanlaatu vaatimukset, käytettävät valmistusprosessit ja menetelmät. Organisaation sisällä tulisi standardeja ylläpitää ja päivittää, tuotekehitysryhmälle, jotta standardit otetaan huomioon tuotetta suunnitellessa. (Hidahl 2002, s. 69).

Kolmas DFMA:n perinteisistä näkökulmista on yleisten materiaalien ja valmistusprosessien käyttäminen tuotesuunnittelussa. Kun organisaation sisällä on määritetty edellä mainittuun tapaan standardit tuotesuunnittelussa, tulisi tuotesuunnittelussa olla myös ohjeet yleisten materiaalien ja valmistusprosessien käyttöön. Erikoismateriaalin käyttäminen tuotteessa voi johtaa valmistamisongelmiin, kun tällaista uutta materiaalia ei kyetä työstämään tai käsittelemään samoilla vanhoilla valmistusprosesseilla organisaation sisällä. (Hidahl 2002, s. 69).

Neljäs DFMA:n perinteisistä näkökulmista on toleranssien määrittely. Toleransseja määrätessä tuotteeseen tulisi suunnittelijan olla täysin tietoinen organisaation valmistuksen valmiuksista toleranssien, pinnanlaatuvaatimusten ja välyksien suhteen. Tässä vaiheessa tuotesuunnittelua tulisikin pyrkiä murtamaan suunnittelun ja valmistuksen välistä näkymätöntä muuria, jotta saataisiin vältettyä vaikeasti valmistettavat tuotteet. Suunnittelijan tulisi valmistushenkilöstön neuvojen avulla määrittellä tuotteiden osiin sellaiset toleranssit, jotka ovat helposti valmistettavissa organisaation sisällä. Tällä tarkoitetaan, että huomioon tulee ottaa oman tehtaan valmistus valmiuksien lisäksi toimittajien valmistuksen valmiudet. Tässä vaiheessa kyetäänkin toteuttamaan rinnakkaisuunnittelua, jotta kyetään olemaan tietoisia organisaation valmiuksista heti suunnittelun alkuvaiheissa. (Hidahl 2002, s. 69).

Kirjallisuudesta löytyy muitakin toimenpiteitä, joita ei ole kehitelty näiden näkökulmien perusteella ja siksi eritelläänkin nyt tässä kappaleessa erikseen. Kokoonpanon vaiheet tulisi suunnitella oman organisaation tuotannon valmiuden mukaan, mutta DFMA ohjeena on suunnitella tuote niin, että se kyetään valmistamaan automatisoidussa tuotannossa. Yleensä

jos tuote suunnitellaan automatisoituun tuotantoon, kyetään se valmistamaan myös manuaalisesti. Kokoonpanoa, mietittäessä tuotesuunnittelussa tulisi muistaa suunnitella tarpeeksi tilavat rakenteet, jotta osat on helppo kokoonpanna manuaalisesti tai automaattisesti, työkalut mahtuvat tarvittaviin väliin, automaattisessa kokoonpanossa käsittelyrobottien tartuntapäät mahtuvat ottamaan kiinni osista tai rakenteesta. Kokoonpanemisen kannalta tulisi suunnittelussa käyttää osia, joita kyetään asentamaan rakenteeseen monesta eri suunnasta, eikä vain yhdestä ja välttää osia, jotka ovat helposti asennettavissa väärin. Kokoonpanoon tulisi myös suosia itsestään paikalleen ohjautuvia osia ja ohjauspintoja. (Eskelinen 2013, s. 12–13).

Lopuksi kerätään yhteen edellisissä kappaleissa mainitut ja kirjallisuudesta löydetyt DFMA:n mukaiset toimenpiteet yhteen listaan. Listaan kerätyt toimenpiteet on kerätty useasta eri lähteestä ja usealta eri ajan jaksolta, kuitenkin jokainen niistä on edelleen käyvä DFMA:n mukaiseen tuotesuunnitteluun. Kirjallisuuden DFMA:n mukaisen tuotesuunnittelun toimenpiteet (Hidahl 2002, s. 69; Eskelinen 2013, s. 12–13; Kuo, Huang & Zhang 2001, s. 244–245; Nasr & Kamrani 2007, s. 5–6; Selvaraj, Radhakrishnan & Adithan 2008, s. 14–15; Suresh, Ramabalan & Natarajan 2016, s. 107–109; Harik & Sahmrani 2010, s. 701–703; Soh, Ong & Nee 2016, s. 12–14; Biesek & Ferreira 2016, s. 705–708; Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 1–14):

- Osien vähentäminen tuotteen rakenteessa
- Kiinnikkeiden ja kiinnittämisen lisä osien vähentäminen tuotteen rakenteessa
- Monitoimisten osien hyödyntäminen tuotteen rakenteessa
- Osien uudelleensuuntausten vähentäminen valmistusvaiheessa
- Modulaaristen kokoonpanojen hyödyntäminen suunnittelussa
- Valmistus menetelmien ja vaiheiden minimointi
- Osien symmetroiminen tai liioiteltu epäsymmetroiminen
- Yksinkertaisen osien ja kokoonpanon käsittelyn, sekä kuljetuksen varmistaminen
- Kokoonpanemisen suunnittelu yhdestä suunnasta tuotesuunnittelussa
- Standardien mukaisten materiaalien, suunnitteluprosessien ja valmistusprosessien käyttö tuotesuunnittelussa
- Standardien mukaisten komponenttien, geometrioiden, valmistuksen työkalujen ja suunnittelu menetelmien käyttö tuotesuunnittelussa

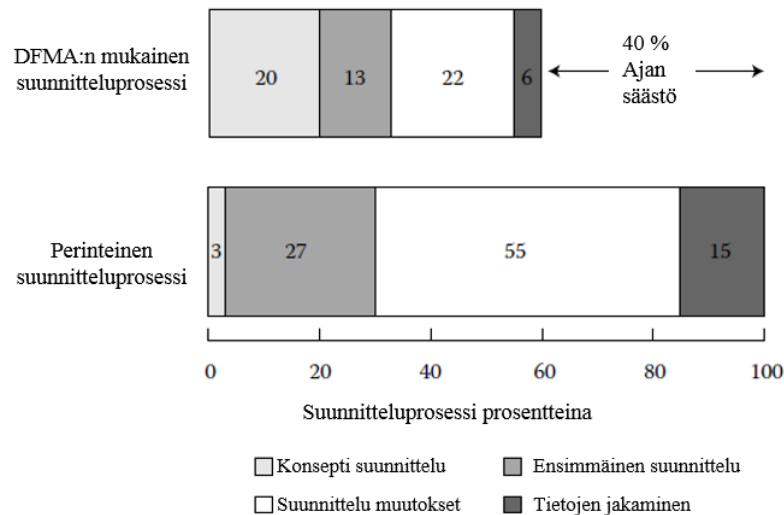
- Vaikeasti valmistettavien osien välttely
- Yleisten materiaalien ja valmistusmenetelmien suosiminen tuotesuunnittelussa
- Toleranssien määrittäminen oman organisaation (oman tehtaan ja tuottajan) valmiuksien mukaan
- Tarpeeksi tilavat rakenteet ja välit kokoonpanon kannalta
- Monesta eri suunnasta asennettavien osien suunnittelu
- Ohjaavien pintojen käyttö kokoonpanoa ajatellen

2.4 DFMA:n tuomat edut tuotesuunnittelussa

DFMA:n mukaisella tuotesuunnittelulla pyritään suunnittelemaan tuote valmistuksen ja kokoonpanon näkökulmista. DFMA:n mukaiset pyrkimykset ovat kasvattaa suunnittelijoiden tietoisuutta valmistuksen ja kokoonpanon näkökulmista, sekä yhdistää tuotesuunnitteluun monen eri ryhmän panoksia (CE). Näillä pyrkimyksillä saadaan häivytettyä suunnittelijoiden ja valmistuksen, sekä kaupallisen puolen välissä olevia näkymättömiä seiniä, joista oli aikaisemmin puhe. Tämän organisaation yhtenäistymisen ohella pyritään DFMA:n mukaisella uudistetulla tuotesuunnittelulla vähentämään tuotteen läpimenoaikaa organisaatiossa, tuotekehitykseen laitettavaa aikaa ja rahaa, parantamaan tuotannon tuottavuutta, tuotteen laatua ja luotettavuutta. (Eskelinen 2013, s. 6–13.) Tässä kappaleessa eritellään, kuinka DFMA:n toimenpiteiden avulla näihin pyrkimyksiin tullaan pääsemään.

DFMA:n positiivisia vaikutuksia voidaan nähdä jo suunnitteluprosessissa, joka tehostuu DFMA:n myötä. DFMA:ssa on tarkoitus luoda ohjeet suunnittelijalle, jolla kyetään estämään valmistuksen tai kokoonpanon aikana syntyvät muutokset. Tämän johdosta voidaankin todeta, että DFMA:n mukaisella suunnittelulla kyetään säästämään 40 % suunnitteluprosessin viemästä ajasta. Kuvassa 5 on esitelty Boothroydin ja Dewhurstin esittämä suunnitteluprosessin ajankäyttö prosenttiosuksina niin perinteisessä, kuin DFMA:n mukaisessa suunnitteluprosessissa. Heidän teoriansa mukaan suunnittelu koostuu konsepti suunnittelusta, ensimmäisestä suunnittelusta, suunnittelu muutoksista ja tietojen jakamisen vaiheesta. DFMA:n mukana tuoma 40 % ajan säästö koostu suurimmalta osalta suunnittelu muutoksien radikaalista muutoksesta. Tämä muutos johtuu siitä koska DFMA:ssa otetaan valmistuksen ja kokoonpanon asiat jo ennalta huomioon, ettei niitä tarvitse suunnittelusta jälkikäteen muuttaa enää. Tämä kuitenkin lisää hiukan konsepti

suunnittelun vaihetta, koska huomioon otettavia asioita on enemmän. Seuraavaksi, kun asiat on ennalta mietitty ja jaettu monen eri ryhmän kesken konseptisuunnittelun vaiheessa, niin saadaan ensimmäisen suunnittelu ja tietojen jakamisen vaihettakin pienennettyä paljon. (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 5–8).



Kuva 5. DFMA:n tuomat muutokset suunnitteluprosessien ajankäytön suhteen prosentteina muok. (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 7).

DFMA:n mukainen tuotteen yksinkertaistaminen tuo niin ajallista, että rahallista säästöä, joka tuotekehityksen vaiheessa. Yksinkertaistamisen toimenpiteillä osien, kiinnikkeiden ja uudelleensuuntauksien minimoimisella saadaan vähennettyä tulevia suunnittelu määrien tarpeita, kokoonpantavien osien määrää, valmistettavien osien määrää, tuotteen läpimeno aikaa, mahdollisuuksia epäonnistua kokoonpanossa ja valmistuksessa, sekä varastoinnin tarvetta. Yksinkertaistamisen toimenpiteillä saavutetaan myös korkeampi luotettavuus tuotteen rakenteelle. Monitoimisten osien käyttäminen vähentää myös osien määrää ja näin myös valmistusta, sekä kokoonpano. Modulaariset osakokonaisuudet ovat hyvä tapa kehittää suunnitelmia jatkossa, kun tarvitsee muokata vain osakokonaisuuksia eikä koko rakennetta. Myös näiden osakokonaisuuksien korjaaminen ja vaihtaminen helpottuvat rakenteesta. Yksinkertaistamista tulisi myös toteuttaa erikseen valmistuksen vaiheessa, jossa tulisi minimoida valmistuksen vaiheet ja menetelmät. Tällä tavoin saadaan vähennettyä valmistuksen viemää aikaa, mahdollisia investointi- ja valmistuskustannuksia. (Hidahl 2002, s. 70–71; Selvaraj, Radhakrishnan & Adithan, 2007, s. 14–15).

DFMA:n näkökulma standardoiminen voi olla suunnitteluprosessin yksi kustannustehokkaimmista keinoista. Organisaation sisäisten käytettävien standardien määrittelemisen materiaaleissa, osissa ja suunnitteluprosesseissa voi vähentää tuotteen läpimenoaikaa, sekä kustannuksia. Samaan aikaan tuotteen luotettavuus ja tuotteen arvo asiakkaalle kasvaa. Organisaatio saa samalla selkeät ohjeet toiminnassaan ja kykenee näin tuottamaan yhteneväistä tuotetta läpi koko organisaatio ketjun. (Hidahl 2002, s. 71).

Toleranssien ja välyksien määrittäminen organisaation sisäisessä toiminnassa on äärimmäisen tärkeää, jotta kyetään tuottamaan luotettava ja toimiva tuote. Organisaation sisäiset valmiudet tuleekin olla suunnittelijoilla selvillä heti suunnitteluiden alkuvaiheissa. Tämä suunnittelun vaihe käydään läpi DFMA:n mukaisessa tuotesuunnittelussa jo konsepti vaiheen alussa, jossa harjoitetaan rinnakkaisuunnittelua. Näin luodaan DFMA:n tuotesuunnittelun kautta luotettavampi ja vältytään vaikeasti valmistettavien tuotteiden valmistus, sekä vältytään valmistusvaikeuksilta. (Hidahl 2002, s. 71).

Organisaatiossa yleisten materiaalin ja valmistusmenetelmien käytöllä säästytään mahdollisilta ylimääräisiltä valmistuskustannuksilta, sekä ajan käytöltä. Erikoiset materiaalit ja valmistusmenetelmät voivat olla organisaatioissa aivan uusia ja voivat aiheuttaaakin paljon ylimääräisiä toimenpiteitä valmistuksen suhteen. Samaan aikaan, jos organisaatio ei ole ennen työstänyt erikoisia materiaaleja tai se joutuu varautumaan uuteen valmistusmenetelmään, vähentää se mahdollisesti tuotteen laatua ja luotettavuutta. (Hidahl 2002, s. 72).

Loppujen lopuksi valmistus- ja kokoonpano ystävällisen tuotesuunnittelun toteuttamisessa on kyse organisaation sisäisten ja yhtenäisten ohjeiden luomisesta tuotekehityksen suunnitteluvaiheeseen. Tämä tarkoittaa uusien ohjenuorien luomista tai uusien ohjeiden sisällyttämistä organisaation toimintaan. Uuden soveltaminen on aina haaste yrityksen toiminnassa, kuitenkin DFMA on osoittanut menestystä ja tuloksia useissa tutkimuksissa vuosien mittaa. (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 15–25).

3 OHUTLEVYOSIEN SUUNNITTELU DFMA: N NÄKÖKOHDISTA

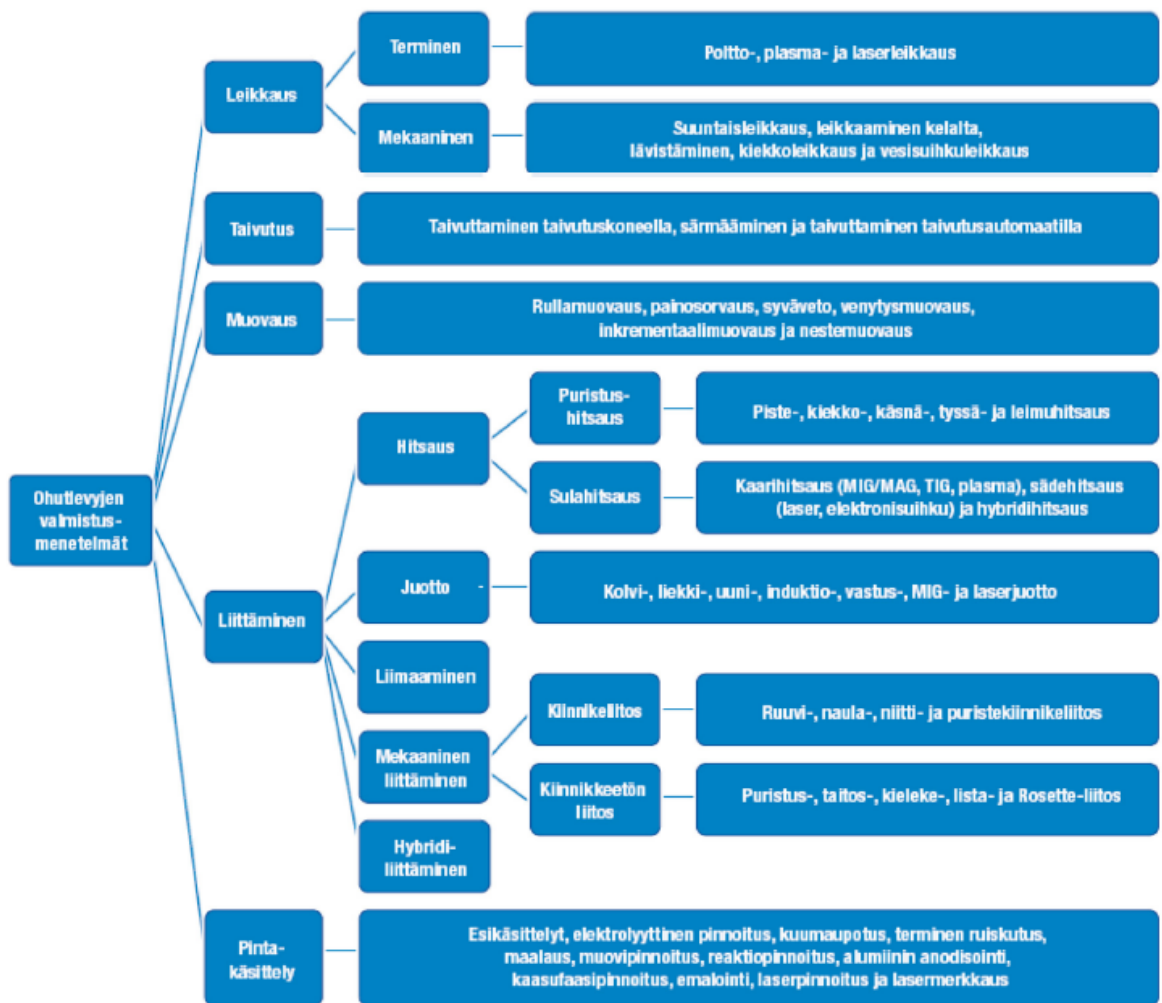
Ohutlevyjä käytetään tuotteissa, joissa tarvitaan vaikeita geometrioita ja ohuita seinämän paksuuksia. Ohutlevyillä tarkoitetaan 3 millia ohuempia levyjä, joita kyetään leikkaamaan, taivuttamaan ja muovaamaan (Matilainen et. al, 2011, s. 3). Myös tutkimuksen uudelleensuunniteltavasta ilmanvaihtokoneesta löytyy ohutlevyistä koostuva runko. Tämän vuoksi on tärkeää tarkastaa, mitä seikkoja tulee ottaa huomioon juuri ohutlevyistä koostuvan rakenteen, jossa pyritään toteuttamaan DFMA:n näkökulmia ja toimenpiteitä. Tässä kappaleessa uudelleensuunnittelussa käydään läpi ohutlevyrakenteiden valmistus- ja kokoonpano ystävällistä tuotesuunnittelua tutkimuksen ilmanvaihtokoneen valmistamisen puitteissa. Kappaleeseen on rajattu valmistusmenetelmät, joita esiintyy yrityksen ilmanvaihtokoneen valmistamisessa niin vanhassa suunnittelussa, kuin uudessa suunnittelussa.

Myös ohutlevyistä koostuvia rakenteita suunnitellessa tulee muistaa valmistus- ja kokoonpano ystävällinen tuotesuunnittelu, jotta kyetään takaamaan optimaalinen tuote. DFMA:n näkökulmia ja toimenpiteitä kyetään soveltamaan myös ohutlevy osiin todella hyvin. Esimerkiksi osien yksinkertaistaminen onnistuu ohutlevyosissa hyvin, koska ohutlevyosiin kyetään valmistamaan vaikeita geometrisia muotoja, joilla kyetään yhdistämään osia tai eliminoimaan osia ja kiinnikkeitä. Siksi on tärkeää, että suunnittelija on tietoinen, millä menetelmällä kyetään ohutlevyosiin valmistamaan, millä menetelmällä ja mitä organisaation toimia tällainen valmistaminen vaatii. (Selvaraj, Radhakrishnan & Adithan, 2007, s. 14–15).

Samaan aikaan tuotesuunnittelijan tulisi olla tietoinen valmistuskustannuksista ja oman organisaation valmistuksen valmiudesta, sekä mahdollisista syntyvistä investoinneista. Optimaaliseen suunnitteluun tähdätessä tulee suunnittelijan ottaa huomioon monia asioita ja tämän vuoksi tulisi suunnittelijalle taata tarpeeksi informaatiota ohutlevyosuunnittelusta. (Boothroyd, Dewhurst & Knight 2011, s. 15–25.) Tämän vuoksi tässä kappaleessa käsitellään yleisimmät valmistusmenetelmät ja niistä syntyvät geometriaominaisuudet.

3.1 Ohutlevy tuotteiden valmistusmenetelmät

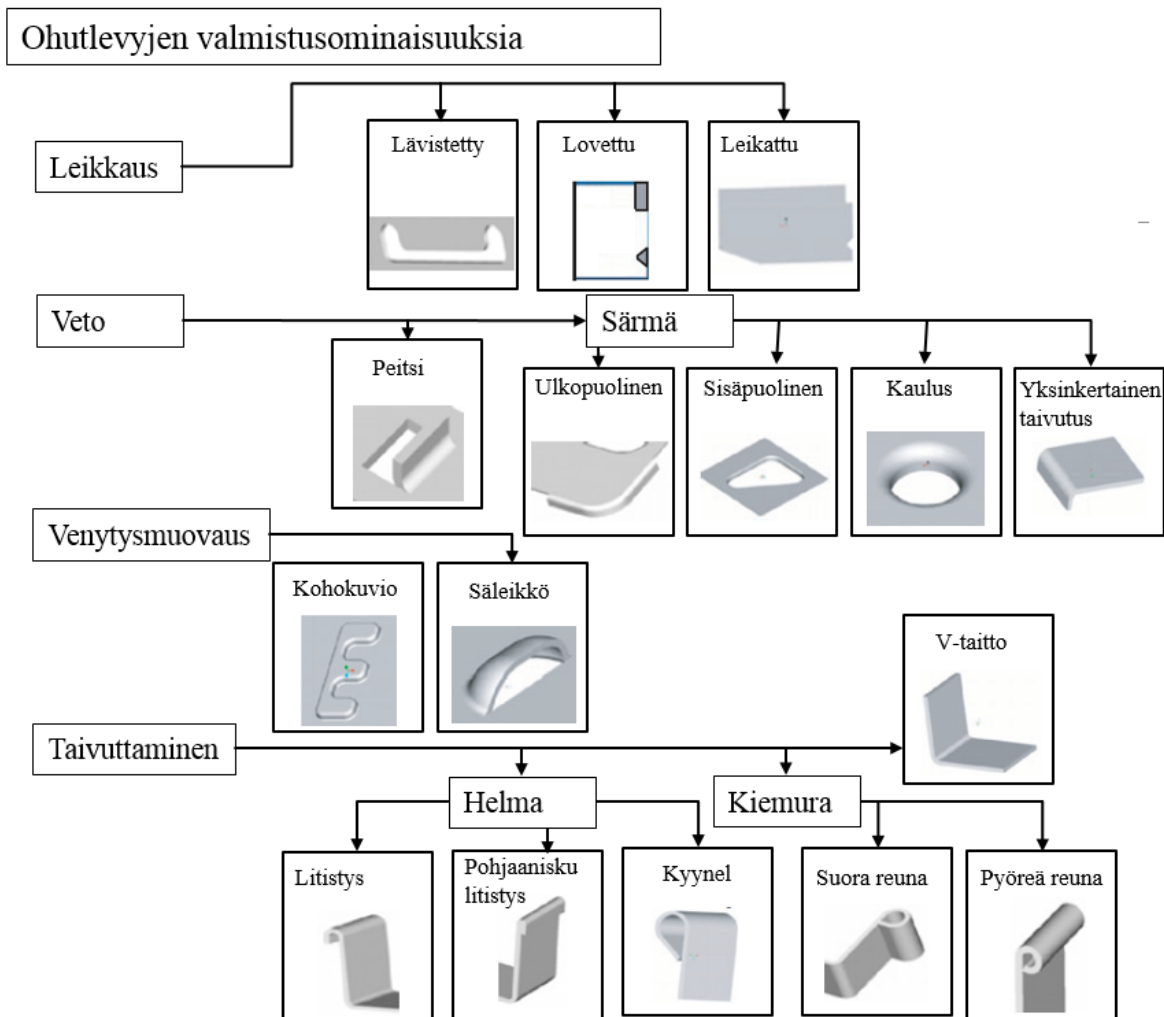
Ohutlevyjä valmistetaan usealla erilaisella menetelmällä ja jokaisesta menetelmästä löytyy erilaisia toteuttamisvaihtoehtoja, erilaisiin tuote tarpeisiin. Tuotesuunnittelijan valitsemat ohutlevy tuotteen geometriat määräävät mitä valmistusmenetelmää tulisi soveltaa tuotteen valmistamiseksi (Selvaraj, Radhakrishnan & Adithan, 2007, s. 15). Kuvassa 6 nähdään Matilaisen et al. (2011) luoma vuokaavio ohutlevy tuotteiden yleisimmistä valmistusmenetelmistä ja niiden toteuttamistavoista.



Kuva 6. Ohutlevyjen valmistuksessa käytettävät menetelmät luokiteltuna (Matilainen et al, 2011, s. 4).

Suunnittelijan tulee olla myös tietoinen, minkälaisia geometrioita näillä yleisimmillä ohutlevyjen valmistus menetelmillä kyetään valmistamaan. Seuraavassa kuvassa 7 kyetään yhdistämään yleisimpien valmistusmenetelmien tuottamia ohutlevyosien yleisiä

ominaisuuksia. Kuvassa on jaoteltu leikattuja, vedettyjä, venytysmuovattuja, sekä taivutettuja ohutlevyominaisuuksia. Kuten kuvasta nähdään, ohutlevyrakenteista kyetään valmistamaan hyvinkin vaikeita geometrioita. (Kannan & Shunmugam, 2009, s. 941–942).



Kuva 7. Ohutlevyjen valmistusominaisuuksia eri laisilla valmistusmenetelmillä muok. (Kannan & Shunmugam, 2009, s. 945).

3.1.1 Ohutlevyjen leikkaaminen

Leikkaus on valmistusmenetelmä, jota tullaan yleensä käyttämään ensin ohutlevytuotteen valmistuksessa. Kuvassa 6 leikkausmenetelmät jaoteltiin termisiin ja mekaanisiin leikkausmenetelmiin. Kuitenkin tuotesuunnittelussa leikkausmenetelmiä valittaessa tulee ajatella, minkälaisien muotojen leikkaamiseen leikkausmenetelmä soveltuu. On kahdenlaisia leikkauksia geometrioiltaan, suoraleikkaus ja muotoleikkaus. Suoraleikkauksessa syntyy vain suoria leikkauslinjoja. Suuntaisleikkauksia ja leikkaaminen

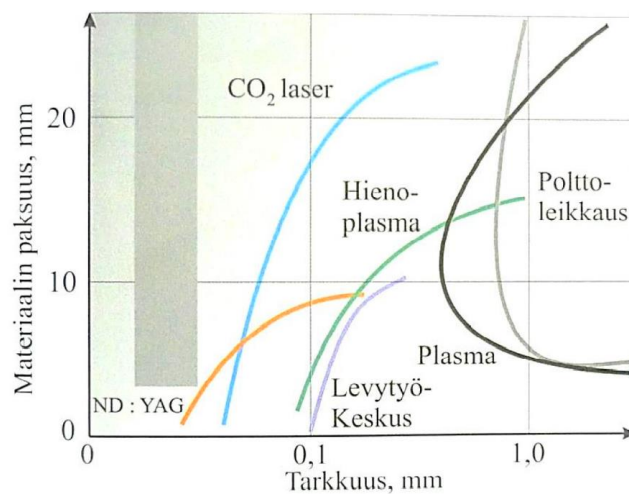
kelalta ovat leikkausmenetelmiä, joilla kyetään suorittamaan vain suoraleikkausta. Muotoleikkauksella tarkoitetaan, että leikkauksessa voidaan valmistaa erimuotoisia reikiä, kaaria ja kulmia. Lävistys ja kiekko-leikkaus ovat leikkausmenetelmiä, jotka kykenevät ainoastaan muotoleikkaukseen. Poltto-, plasma-, vesisuihku- ja laserleikkaus, sekä nakerrus ovat leikkausmenetelmiä millä onnistuu, niin suoraleikkaus kuin muotoleikkauskin. Tuotesuunnittelussa tulee myös huomioida materiaalivalinnat leikkausmenetelmää valittaessa. Kaikki leikkausmenetelmät eivät sovellu erilaisia materiaaleja leikatessa. (Matilainen et. al, 2011, s. 142–143).

Ohutlevy tuotteita valmistaessa tulee myös miettiä mitkä leikkausmenetelmät soveltuvat tehokkaimmin ohutlevyjen leikkaukseen. Esimerkiksi mekaanisista menetelmistä hyvin yleisesti ohutlevy valmistuksessa käytettyjä menetelmiä ovat suoraleikkaus menetelmät suuntaisleikkuu ja leikkaaminen kelalta. Ohutlevymateriaalit ovat hyvin usein materiaalivalmistuksen jälkeen kelalla, josta ne täytyy leikata arkeiksi. Tässä prosessissa kelalta tuleva ohutlevy suoritetaan oikaisuvalseilla ja leikataan mekaanisilla leikkureilla arkeiksi. Suuntaisleikkuu on yleisin käytettävä mekaaninen menetelmä leikata ohutlevyjä, jos halutaan tuottaa suorareunaisia paloja tai liuskojen muotoisia osia. (Matilainen et. al, 2011, s. 143–205).

Muotoleikkaukseen kykenevistä menetelmistä tulisi erottaa menetelmät, joilla on tehokkainta suorittaa ohutlevyjen eli alle 3 millimetriä paksujen materiaalien leikkaaminen. Termisistä leikkausmenetelmistä polttoleikkaus soveltuu tyypillisesti 10 - 300 mm paksuisiin materiaaleihin ja plasmaleikkaus soveltuu tyypillisesti 3 - 60 mm paksuisiin materiaaleihin. Termisistä leikkausmenetelmistä voidaan sanoa, että laser leikkuu, joka on ohutlevyjen leikkauksessa, mekaanisten menetelmien ohella, yksi suurimmista yksisuurimmista menetelmistä, on soveltuvin ohuiden materiaalien leikkaukseen. Leikkaavista lasereista yleisin on peili/linssi-optiikalla toimiva CO₂-laseri, jolla yleisin leikattavat materiaalit ovat 0,5 – 20 mm. Toinen yleinen käytettävä leikkaava laser on Nd:YAG-laser, jonka toiminta perustuu laser säteen kuljetukseen optisen kuidun läpi. Tässä menetelmässä laser säteen ohjaaminen on helpompaa. (Matilainen et. al, 2011, s. 143–205).

Mekaanisista leikkausmenetelmistä erilaisten muotojen valmistamiseksi parhaiten soveltuu lävistämismenetelmä. Leikkausmenetelmällä kyetään luomaan suljettuja muotoja tai

voidaan jopa leikata kappaleen ulkoreunoja, niin että lävistystyökalulla isketään vieri viereen leikaten reunaa. Tätä menetelmää kutsutaan nakerrukseksi. Lävistämismenetyelmässä levy leikataan leikkaimella, joka koostuu lävistävästä pistimestä ja tukevasta tyynystä. Lävistys suoritetaan nykyään yleisimmin, joko hydraulisilla tai servotoimisilla levytyökeskuksilla. Levytyökeskuksissa lävistämistyökalu koostuu pistimestä, irrottimesta ja tyynystä. Levytyökeskuksien työkalujen muodot ovat standardisoituja, kuitenkin yleisimmät lävistystyökalujen muodot ovat neliömäinen ja pyöreä reikä. (Matilainen et. al, 2011, s. 169–192). Vertailtaessa, jokaista muotoiluleikkaus menetelmää tulee miettiä mikä on tehokkain tapa leikata ohutlevyä tuotannossa. Kuvassa 8 nähdään näiden leikkausmenetelmien tarkkuuksien vertailua tietyillä materiaalipaksuuksilla. Tästä kuvasta nähdään myös, ettei polttoleikkauksen ja plasmaleikkauksen kaaret ulotu edes ohutlevy materiaalivahvuuksille. Tarkimmat tarkkuudet ohutlevyisä kyetään saamaan Nd:YAG-kuitulasereilla. (Matilainen et. al, 2011, s. 200–205).



Kuva 8. Muotoiluleikkausmenetelmien tarkkuuksien vertailua tietyillä materiaalipaksuuksilla (Matilainen et. al, 2011, s. 201).

Tärkeimpiä ominaisuuksia laserleikkaukselle ohutlevy valmistuksessa on myös leikkuun vapaa muotoilu, pienien reikien (puolet materiaali vahvuudesta) ja terävien kulmien valmistamisen mahdollisuus, suuri leikkausnopeus, mittatarkkuus, pienet muodonmuutokset leikattavassa kappaleessa, sekä laaja leikattavien materiaalien kirjo. Huonoja ominaisuuksia laserleikkauksessa ovat laitteistojen investointikustannukset voivat olla suhteellisen korkeat, laserilla voidaan toisinaan tuottaa ylilaatua ja jotkut heijastavat materiaalit ovat vaikeasti leikattavia (CO₂-laserilla onnistuu pulssittaminen, jossa heijastus ei haittaa). Laserleikkaus

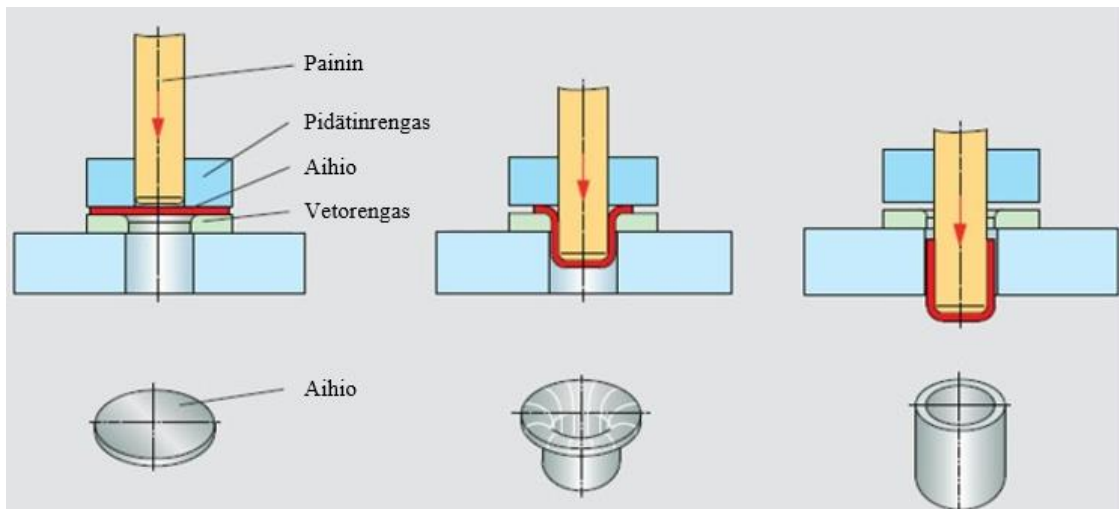
onkin nousemassa yhdeksi käytetyimmistä ohutlevyjen leikkausmenetelmistä. Laserleikkauspää kyetään myös yhdistämään levytyökeskukseen, jolloin levytyökeskuksen valmistusmahdollisuudet kasvavat. (Matilainen et. al, 2011, s. 158–169). Tästä aiheesta lisää levytyökeskus kappaleessa.

3.1.2 Ohutlevyjen muovaus

Työssä uudelleen suunniteltavassa ilmanvaihtokoneesta löytyy myös ohutlevyjen muovausta. Ohutlevyjen muovaus menetelmiä ovat rullamuovaus, inkrementaalimuovaus, painosorvaus, venytysmuovaus, syväveto, kulmamuovaus ja nestemuovaus keinot putkien suurpainemuovaus, sekä hydromekaaninen syväveto (Matilainen et. al, 2011, s. 215). Tässä työssä tullaan kuitenkin keskittymään kahteen muovaus menetelmään, joita sovelletaan myös ilmanvaihtokoneen valmistuksessa. Nämä menetelmät ovat syväveto ja venytysmuovaus.

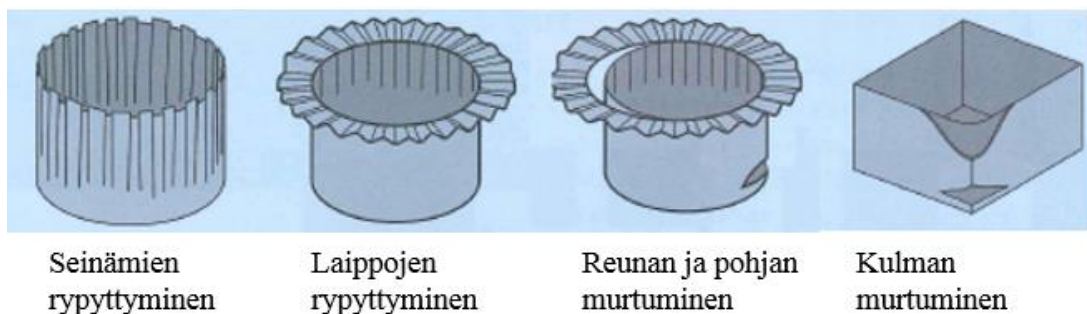
Ohutlevyjen muovauksessa käytetään kylmämuovaus menetelmiä missä ei esiinny lämmöntuontia muovaukseen. Kylmämuovauksen etuja ohutlevyissä on valmistusnopeus, lujuus, hyvä pinnanlaatu ja mittatarkkuudet. Muovaus valmistusmenetelmillä kyetään myös tuottamaan useita eri muotoja, jotka voivat lisätä tuotteen toiminnallisuutta. Ohutlevyjen muovattavuuteen ja muovauksen onnistumiseen vaikuttaa materiaalivalinnat ja muovausprosessin ominaisuudet esimerkiksi muovaustyökalut. (Matilainen et. al, 2011, s. 215).

Syväveto on kylmämuovausmenetelmä missä materiaalia aihiota muovataan syvävetotyökaluilla. Syvävetotyökaluihin kuuluu painin, pidätinrenkas vetorenkas. Syväveto prosessissa levyaihion materiaalipaksuus pyritään pitämään samana, vaikka prosessissa painin työntyy pidätinrenkaan läpi ja alkaa työntää levyaihiota vetorenkaan läpi. Levyaihio muotoutuu näin vetorenkaan ja painimen mukaan. Kuvassa 9 nähdään havainnollistava kuvaaja syväveto prosessista vaiheittain. Punainen nuoli esittää prosessissa käytettäviä voimia ja levyaihio esiintyy punaisena levynä, joka alkaa prosessin edetessä muovautua. (Matilainen et. al, 2011, s. 220–221; Groover, 2010, s. 454–456).



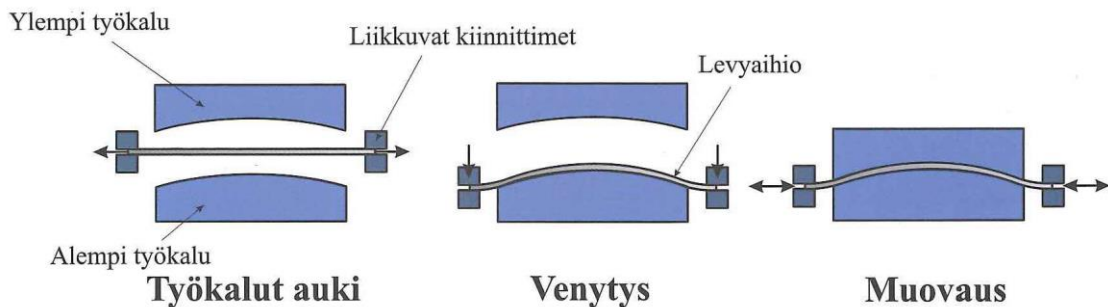
Kuva 9. Syvävedon periaate muok. (SFS intec-netti sivut, 2017).

Yhdellä syvävedolla kyetään tuottamaan vaan rajallisen syvyinen kuppimainen aihio. Syvyys, mikä kyetään tuottamaan yhdellä syvävedolla, riippuu muovattavan kupin rajavetosuhteesta. Rajavetosuhde muodostuu levyaihion ja painimen halkaisijan suhteesta. Jos aihion rajavetosuhde ylitetään voi vedettävä materiaali murtua. Syvävedossa esiintyy muitakin vetovirheitä, jotka voidaan huolellisella suunnittelulla estää. Syvävedon yleisimmät vetovirheet ovat materiaalin murtuminen, sekä aihion profiilin rypytyminen. Rypyttymistä voi syntyä, jos aihiossa esiintyy puristusjännityksiä kehän suunnassa. Kuvassa 10 esitetään esimerkit murtumisesta, sekä rypytyksestä useammassa eri tapauksessa. Muita vetovirheitä, joita voi syntyä syvävedossa ovat poimut, työkalujen jättämät kehät, vetojäljet, appelsiinipinta, naarmut, korvien muodostuminen ja kiillottuminen. (Matilainen et. al, 2011, s. 220–221; Groover, 2010, s. 459–461).



Kuva 10. Syvävedossa syntyviä yleisimpiä vetovirheitä muok. (Matilainen et. al, 2011, s. 222).

Venytysmuovaus on vastaavanlainen ohutlevyjen muovaus menetelmä, kuin syvävedo. Venytysmuovauksessa, kuitenkin materiaali aihion paksuus vaihtuu muovauksen johdosta. Venytysmuovaus prosessissa reunojen liikkuminen on estetty vetorenkaan ja levynpidättimen avulla. Näin materiaalin reunat pidetään paikoillaan ja aihion materiaali venyy. Syvävedossa materiaali virtaa työkalun liikkuessa, kun taas venytysmuovauksessa se venyy muotoonsa. Venytysmuovaus menetelmässä levyaihiota paikoillaan pitää liikkuvat kiinnittimet. Ensimmäisenä vaiheena alatyökalu venyttää levyaihiota omaan muotoonsa. Tämän jälkeen ylätyökalu tulee levyaihion, sekä alatyökalun päälle ja muoaa levyaihion viimeisimpään muotoonsa. (Matilainen et. al, 2011, s. 226–227). Kuvassa 11 nähdään venytysmuovaus prosessin vaiheet ja työkalut toiminnassaan.



Kuva 11. Venytysmuovauksen periaate ja vaiheet (Matilainen et. al, 2011, s. 227).

Venytysmuovauksessa ei kyetä valmistamaan yhtä syviä kappaleita, kuin syvävedossa. Kuitenkin venytysmuovauksessa kyetään valmistamaan monimutkaisempia kappaleita, kuin syvävedossa. Venytysmuovauksessa tulee arvioida aihion materiaalin muokkauslujittumiseksponenttia, jolla määritellään materiaalin kyky muovautua. Venytysmuovauksessa materiaali on vaarassa murtua ja mitä suurempi muokkauslujittumiseksponentti materiaalilla on, sitä paremmin sitä voidaan venytys muovata. Muokkauslujittuvia materiaaleja ovat esimerkiksi ruostumaton teräs, titaani ja alumiiniseokset. (Matilainen et. al, 2011, s. 227–228).

3.1.3 Ohutlevyjen taivuttaminen

Ohutlevyjen taivuttaminen on yleinen valmistusmenetelmä ohutlevyosien valmistuksessa. Suunnittelijan tulisi tietää suurin piirtein taivuttamisen prosessi, jotta hän kykenee ymmärtämään mitä ongelmia tässä valmistusmenetelmässä voi tapahtua. Taivuttamisprosessissa levyyn kohdistuu venymiä ja jännityksiä. Taivutettavaa materiaalia

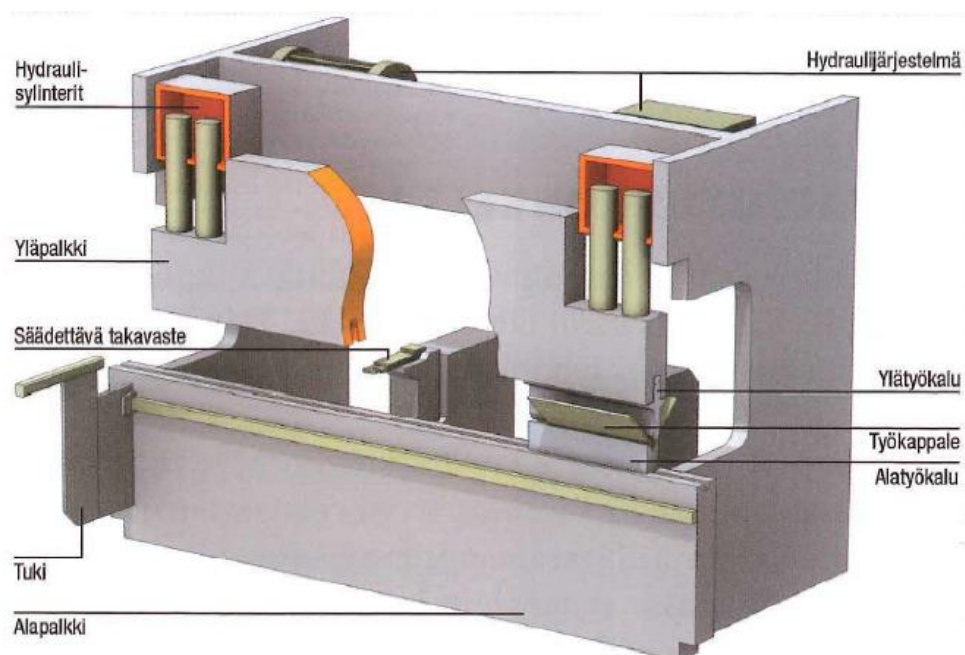
tarkastelemalla näiden kohdistuvien venymien ja jännityksien kannalta voidaan todeta, että taivuttamisprosessi voidaan jakaa kolmeen osaan. Ensimmäisessä vaiheessa materiaalin myötöraja ei ylitetä, jolloin materiaali voi palautua suoraksi, jos taivuttaminen lopetetaan. Tällöin materiaalin taivuttaminen on vielä elastista. Toisessa vaiheessa taivutettavan levyn pinnalta materiaalin myötölujuus alkaa ylittyä, jolloin tapahtuu plastista muodonmuutosta. Kun levyn taivuttamista jatketaan kuormitusta lisäämällä, etenee plastinen muodonmuutos levyn pinnalta levyn sisäkerrokseen, joissa myötölujuus ylittyy myös. Toista vaihetta kutsutaan elastis-plastiseksi taivutukseksi, koska koko levy ei ole vielä kokenut plastista muodonmuutosta ja nämä levyn kerrokset pyrkivät palautumaan normaaliin olotilaan. Viimeisenä vaiheena on kokonaan plastisen muodonmuutoksen vaihe, jossa koko levyn poikkileikkaus on kokenut myötölujuuden ylityksen ja näin plastinen muodon muutos on täydellinen. Tällöin levyn taivutus säde on lähes levyn paksuuden luokkaa. Levyn sisäpinta tyssääntyy ja ulkopinta venyy, sekä materiaali taivutuksen kohdalla ohenee. (Matilainen et. al, 2011, s. 239).

Taivuttamisen yleisimpiä keinoja ovat taivuttaminen taivutuskoneella, taivutusautomaatilla ja särmääminen. Yleisin ja monipuolisin menetelmä näistä kolmesta on särmääminen, mitä käsitellään tässä työssä tarkemmin. Yksinkertaisin taivuttamisen menetelmä näistä menetelmistä on taivuttaminen taivutuskoneella. Taivutuskoneita on käsikäyttöisinä ja hydraulisina malleina. Taivutuskoneen rakenteeseen kuuluu ala- ja yläpalkki, jotka pitävät levyn puristaen paikoillaan ja taivutuspalkki, jolla levyä taivutetaan taivutuksen ulkopinnalla. Taivutuskoneen etuna särmäämiseen verrattuna on se, että taivutuspalkki vierii materiaalia vasten taivutuksen ulkopinnalla. Tällä tavoin mahdollistetaan pinnoitettujen levyjen taivuttaminen niin, ettei pinnoitettu materiaali liu'u työkalua vasten, jolloin pinta voi saada vaurioita. (Matilainen et. al, 2011, s. 239–240).

Taivuttamisautomaatilla kyetään valmistamaan monimutkaisia kappaleita, koska levyn taivutuksessa kyetään taivuttamaan levyä ylös-, sekä alaspäin. Taivutusautomaatilla taivuttaminen sopii myös isojen kappaleiden taivuttamiseen, koska vain levyn reunat liikkuvat taivutusprosessissa ja loppu levy lepää koneen pöytää vasten. Taivutusprosessissa levyä liikutellaan kappaleen käsittelijällä. Levyn pitää paikoillaan taivutuksen ajan ylempi ja alempi levynpidikkeet. Taivutuksen suorittavat taivutustyökalut, joita on kaksi. Toinen taivuttaa yläpuolelta ja toinen alapuolelta. Taivutusautomaatilla taivuttaminen on hyvin

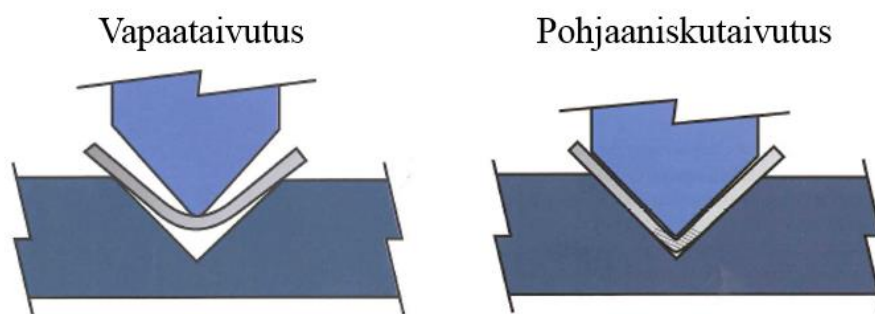
erilaista verrattuna levyjen särmäämiseen. Tämän vuoksi, jos levyn taivuttamiseen on tarkoitus käyttää taivutusautomaattia, tulisi se huomioida suunnittelussa hyvissä ajoin. Esimerkiksi taivutusautomaatilla ei kyetä korkeisiin taivutuksiin, kuten särmäyksessä. (Matilainen et. al, 2011, s. 244–245).

Taivuttamisen yleisin menetelmä eli särmääminen toteutetaan särmäyspuristus laitteistolla. Teollisuudessa on käytössä todella vaihtelevan laisia särmäyspuristimia, joiden työleveydet (eli särmättävän alueen leveys) ja puristusvoimat vaihtelevat. Särmäyspuristimien koot ilmoitetaan niiden työleveyksinä, joka kertoo työkalupalkin leveyden. Särmäyspuristimien koot voivat siis vaihdella 1-10 metriin asti. Jos tulee tarvetta vielä suuremmalle taivutukselle, kyetään särmäyspuristimia käyttämään rinnakkain, jolloin työleveydet kyetään yhdistämään. Puristusvoimat särmäyspuristimissa teollisuudessa vaihtelevat 100–25 000 kN välillä. Teollisuudessa on kolmella eri tavalla toimivaa särmäyspuristinta, mekaanisesti, hydraulisesti ja pneumaattisesti. Suurimmat puristusvoimat kyetään saamaan hydraulisesti toimivalla, joka soveltuu suurtehoa vaativiin käyttötarkoituksiin. Sovelluksiin, jotka vaativat tarkkaliikkeistä särmäyspuristinta löytyy servomoottoreilla toimiva särmäyspuristinkin. Kuvassa 12 nähdään perinteisin särmäyspuristimen rakenne. Tärkeimmät kuvasta näkyvät osat rakenteessa ovat ylä- ja alapalkki, joihin kiinnitetään ylä- ja alatyökalut, nykyaikaisissa puristimissa numeerisesti ohjattavat kappaleen vasteet. (Matilainen et. al, 2011, s. 240–241).



Kuva 12. Hydraulinen särmäyspuristin (Matilainen et. al, 2011, s. 240).

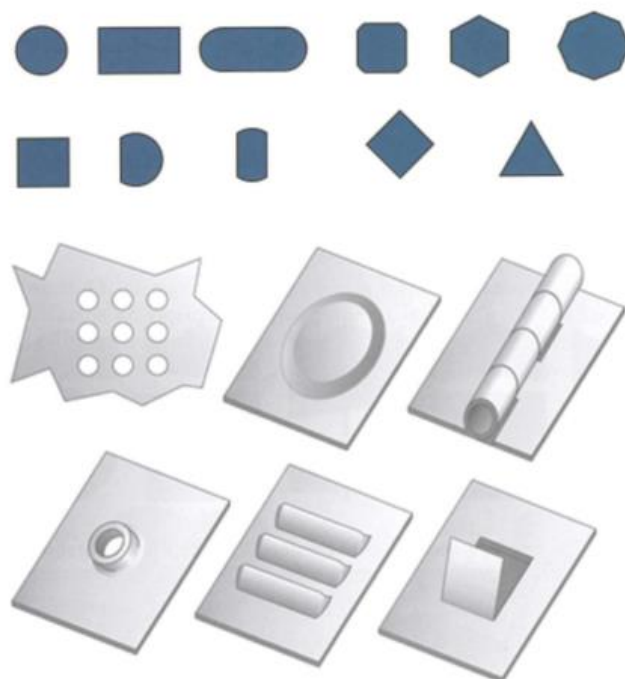
Hydraulisessa särmäyspuristimessa hydrauliset sylinterit sijaitsevat yläpalkin kummassakin päässä. Tällöin sylintereiden muodostama voima kyetään jakamaan suhteellisen tasaisesti koko yläpalkkiin. Yläpalkin liikettä ja työiskun syvyyttä kyetään ohjaamaan numeerisesti. Kuitenkin taivutettavan kappaleen muodon määrittelevät ala- ja yläpalkkiin kiinnitettävät työkalut ja käytettävä särmäysmenetelmä. Erilaisia yleisiä särmäysmenetelmiä ovat vapaataivutus ja pohjaaniskutaivutus. Kuitenkin särmäyspuristimella kyetään valmistamaan myös erikoistyökaluilla litistysiksiä, joissa levyä taivutetaan jopa 180 astetta ja elastista vastinta käytettäessä saadaan taivutus tehtyä ainoastaan ylätyökalun mukaiseen muotoon. Vapaataivutus menetelmässä kappaletta taivutetaan ylätyökalulla ja v-aukollisella alatyökalulla. Levyn taivutuksessa levy tukeutuu ylätyökalun keulaan ja alatyökalun v-aukon kulmiin. Ylätyökalu työntää levyä v-aukon kulmia vasten, muttei kuitenkaan työnnä levyä alatyökalun pohjaan asti. Näin levyn muoto ei määriy työkalujen muodosta vaan niiden etäisyyksistä ja levyn aihioista, sekä materiaalista. Vapaataivutuksella taivutetaan yleensä alle 90 asteen kulmia. Pohjaaniskutaivutuksessa puolestaan levy painetaan ylätyökalulla alatyökalun pohjaan asti. Näin levy muotoutuu työkalujen mukaisesti, sekä tämän vuoksi myös pohjaaniskutaivutus vaatii 3-5 kertaa enemmän puristusvoimaa, kuin vapaataivutus. Pohjaaniskutaivutuksella saadaan aikaiseksi pysyvä muodonmuutos ja todella tarkat muodot. Kuvassa 13 esitetään vapaataivutuksen ja pohjaaniskutaivutuksen periaatteet. (Matilainen et. al, 2011, s. 240–241; Groover, 2010, s. 451–453).



Kuva 13. Yleiset särmäämisenmenetelmät vapaataivutus ja pohjaaniskutaivutus muok. (Matilainen et. al, 2011, s. 241).

3.1.4 Levytyökeskus

Levytyökeskus on ohutlevyteollisuudessa laajasti käytetty ohutlevytuotteiden valmistus laitteisto. Levytyökeskus on monipuolinen kone, jonka toiminta perustuu siihen asennettuihin työkaluihin ja yhdistettyihin toimintoihin. Perinteisellä levytyökeskuksella kyetään valmistamaan ohutlevyihin lävistyksiä, nakerruksia, muovauksia ja taivutuksia. Kaikki edellä mainitut toimenpiteet kyetään suorittamaan modernilla työkalutekniikalla, johon suunnittelijan tulee tutustua, jotta voisi ymmärtää levytyökeskuksen mahdollisuudet. Levytyökeskuksilla kyetään luomaan useita erilaisia muotoja ja ominaisuuksia levyyn. (Matilainen et. al, 2011, s. 181–183.) Kuvassa 14 nähdään lajitelma levytyökeskukseen liitettävien työkalujen muodoista, joita kyetään valmistamaan.



Kuva 14. Levytyökeskuksen työkaluilla luotavia standardin mukaisia reikiä (tumman siniset) ja muotoiluja muok. (Matilainen et. al, 2011, s. 183).

Levytyökeskuksia voidaan myös varustaa kulmaleikkurilla tai laserleikkauspäällä. Kulmaleikkurin varustaminen levytyökeskukseen vähentää osien valmistusaikaa, sillä suorareunaiset osat kyetään leikkaamaan irti arkeista kertaiskulla. Jos suunnittelija luo osat suorareunaisiksi, kyetään osien irrottamista tehostamaan ja osien nestäusta voidaan muuttaa niin, että syntyy materiaalisäästöjä. Laserleikkauspäällä varustettuja levytyökeskuksia sanotaan kombilevytyökeskuksiksi, koska silloin yhdistetään kaksi erilaista

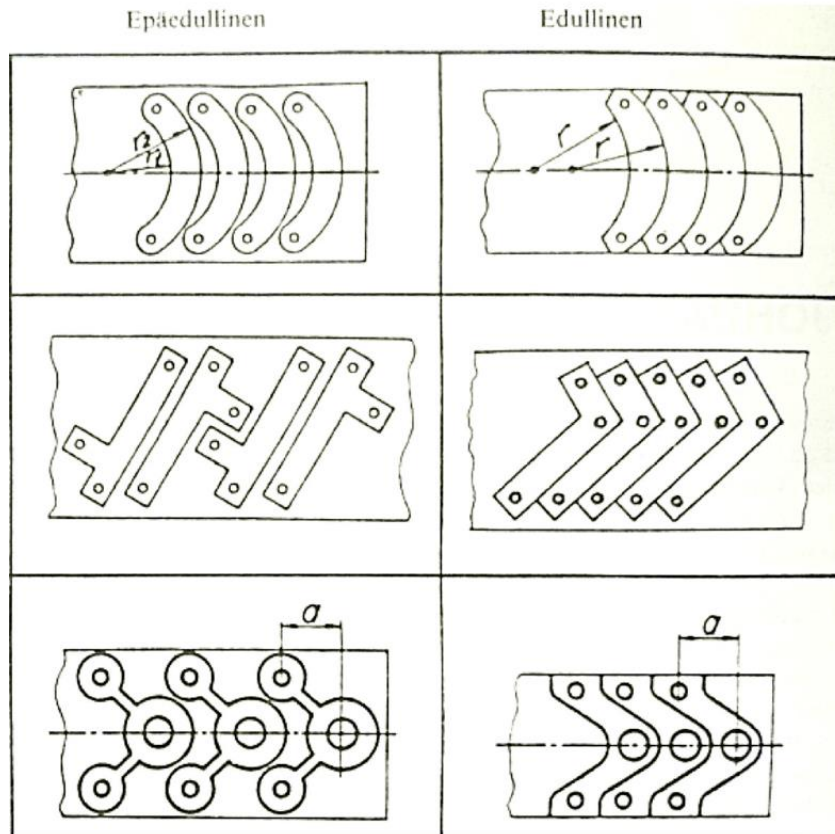
leikkausmenetelmää yhteen. Laserleikkuulla levytyökeskuksilla kyetään tuottamaan leikkaamalla vapaita muotoja ja leikkaamaan irti lävistettyjä kappaleita. Ulkoreunojen nakerrus voidaan jättää pois, jolloin kaarevien muotojen laatu paranee valmistettavissa osissa. Laserleikkuuta käytetään varsinkin muotoihin, joihin ei löydy valmista työkalua. Yhdistetyssä leikkuussa kyetään levytyökeskuksen työkaluilla luoda alkureikä laserleikkuun alkuun, jolloin laserin levyn hitaampi lävistämävaihe kyetään jättämään pois ja valmistusaika nopeutuu. (Matilainen et. al, 2011, s. 181–183).

3.2 Ohutlevytuotteiden suunnittelusäännöt

Yleisimmät geometriaominaisuudet ohutlevyissä ovat pohjan pinta-ala, taivutukset, kaulukselliset reiät, työkalun reiät, ohjausreiät, joggletit, taivutuksen helpotukset ja taivutuksen, sekä pyöristyksen säteet. Näistä geometrisista ominaisuuksista tulee suunnittelijan määrittellä tarkat mitat, säteet ja kulmat. Ohutlevytuotteiden suunnittelussa valmistus- ja kokoonpanoystävällisen tuotesuunnittelun kautta, tulee huomioida organisaation valmistus valmiudet ja menetelmät. (Selvaraj, Radhakrishnan & Adithan, 2009, s. 14–19). Edellisissä kappaleissa käytiin yleisesti läpi ohutlevytuotteiden tuotannon valmistusmenetelmiä. Kuitenkin tässä kappaleessa kerätään kaikki DFMA:n mukaisessa suunnittelussa huomioitavat asiat yhteen esitellyistä valmistus menetelmistä.

3.2.1 Ohutlevyjen leikkauksen suunnittelu

Ohutlevyjen leikkauksessa tulee aina muistaa, että ensimmäinen vaihe valmistuksessa on joko levyarkilta tai -kelalta leikkaaminen. Suurin huomioitava asia tässä prosessissa on, että kappaleet tulisivat, jos mahdollista, suunnitella niin että ne tuottavat levyarkilta leikattaessa mahdollisimman vähä materiaalihukkaa. Tällaisessa suunnittelussa leikattavien kappaleet tulisi olla mahdollista laittaa viereen viereen arkilla ja leikkuumenetelmän tulisi olla mahdollisimman tarkka silloin. Tätä osien asettelua levyille mahdollisimman tehokkaasti kutsutaan nestaukseksi. Kuvassa 14 nähdään, miten leikattavat muodot on alkuun suunniteltu epäedullisesti niin, ettei niitä kyettä asettelemaan arkille tehokkaasti ja materiaalihukkaa syntyy paljon. Edullinen vaihtoehto kuvassa 15 säästää huomattavasti enemmän materiaalia leikkausprosessin jäljiltä. (Matilainen et. al, 2011, s. 177–179).



Kuva 15. Leikkauksen mukaisen osa suunnittelun epäedulliset ja edulliset mallit (Matilainen et. al, 2011, s. 178).

Myös valittaessa leikkausmenetelmää ohutlevyille tulee miettiä, minkälaista laatua leikkaukselta vaaditaan ja mitä muotoja kappaleeseen halutaan. Laserleikkuulla kyetään tuottamaan vapaita muotoja ja leikkuutarkkuus on korkea. Jos organisaatiolla on levytyökeskus, tulisi lävistysleikkuuta käyttää hyväkseen standardimuotoja leikattaessa ja niitä tulisikin suunnittelijan suosia suunnitelmissa. Laserleikkuulla kyetään tekemään ulkoisia tai sisäisiä kaarevia muotoja, joihin ei ole valmista lävistystyökalua olemassa. Kuitenkin tarkat muotoon leikkuut, kuten reiät olisi tehokkainta suorittaa lävistystyökaluilla. (Matilainen et. al, 2011, s. 162–183).

Lävistettyjen geometria ominaisuuksien paikat tulee suunnittelijan määrittellä niiden keskikohtista. Lävistystyökalun keskikohta tulee iskeä juuri lävistyksen keskikohtaan, jolloin tarvittava muoto osataan sijoittaa oikein. Lävistettävissä muodoissa tulisi myös muistaa käyttää standardin mukaisia lävistysreikien kokoja, joita organisaation valmistuksessa kyetään valmistamaan. Nyrkkisääntönä reikien minimi koolle

lävistysvalmistuksessa on kaksi kertaa levyn paksuus. Jos lävistetyissä muodoissa tapahtuu jälkitoimenpiteitä, kuten irrottamisia tai taivutuksia, tulisi näille toiminnoilla suunnitella tarpeeksi tilaa helposti toteutettavaksi. (Matilainen et. al, 2011, s. 180–192).

3.2.2 Ohutlevyjen muovauksen suunnittelu

Muovattavat kappaleet ovat yleensä ohutlevytuotteiden vaikeimmin toteutettavia osia. Ohutlevytuotteiden osien muovauksen suunnittelussa tulee miettiä, kyetäänkö osa korvaamaan, joillain toisen laisella toteutuksella. Muotoilu menetelmiä hyväksi käyttävän osan kustannukset voivat nousta korkeammaksi kuin levytyökoneella suoritettavan muotoilun. Levytyökeskuksen muotoilutyökaluissa ei kuitenkaan kyetä valmistamaan kuin vain 16 mm korkeita muokkauksia. Korkeammat ja vaikeammat muotoilut, joihin ei löydy muovaustyökäluä levytyökeskukseen, tuleekin toteuttaa syvävedolla tai venytysmuovauksella, jos se helpottaa osan valmistamista ja kokoonpanoa. (Matilainen et. al, 2011, s. 182–195).

Ohutlevyosien valmistuksessa syvävedolla tai venytysmuovauksella tulisi pyrkiä välttämään kappaleen jatko- tai lämpökäsittelyjä. Nämä tuovat lisäkustannuksia jo valmiiksi kalliiseen valmistusmenetelmään. Ohutlevyjä on helpompi valmistaa kylmämuovaus menetelmillä ja se onkin yleisempää. Muovausmenetelmissä valmistustyökaluilla voidaan määrittää valmistettavan osan muodot ja kustannukset. Siksi melkein tärkein osa muovaus menetelmissä on valmistustyökalujen huomioiminen suunnitteluvaiheessa. (Matilainen et. al, 2011, s. 220–230).

Syvä vedettäviä osia suunnitellessa tulisi ottaa huomioon useita geometrisia seikkoja. Syväveto valmistuksessa tulisi välttää liian pieniä säteitä seinämien ja pohjan välillä, sekä liian suuria säteitä seinämien ja laippojen välillä. Kuitenkin puolipallomainen pohja on vaikeampi valmistaa kuin tasapohjainen kappale. Puolipallomainen muoto pohjassa voi aiheuttaa kappaleen rypyttymistä. Seinämiä mitoittaessa tulee muistaa, ettei suunnittele liian korkeaa seinämää, jos ei ole tarpeellista, koska tällöin voidaan joutua turvautumaan jatkosyvävetoon vaaditun syvyyden saavuttamiseksi. Seinämien korkeuksia voidaan kasvattaa, jos valitaan paksumpi materiaali. Jos syvävetoa vaaditaan kappaleen syvyyden saavuttamiseksi, on valmistuksen helpottamiseksi suunniteltava halkaisijaltaan pienempi jatkosyvävedettävä kappaleen keskusta. Kun jatkosyväveto suoritetaan, olisi

levynpidätyspinta valmistuksen kannalta helpompi suunnitella kartiomaisena. Seinämiä suunnitellessa yhdellä syvävedolla tulee myös muistaa, etteivät kaarevat, käyrät ja kaltevat pinnat ole valmistuksen kannalta järkeviä. Jos kappaleessa esiintyy laipat seinämien päissä, tulee muistaa, etteivät kartiomaiset laipat onnistu yhdellä syvävedolla. Yksinkertaisimmat ohjeet muovattavia kappaleita suunnittelevalle on: suosi pyörähdyssymmetrisiä kappaleita, vältä liian syvien kappaleiden suunnittelemista, kappaleisiin ei tulisi suunnitella negatiivisia päästöjä, kulmikkaissa tuotteissa tulisi olla avoimet päädyt, suosi muotojen pyöristyyksiä ja päästöjä, sekä suunnittele tuote symmetrisiksi. (Matilainen et. al, 2011, s. 220–230).

Syvävedettäviin tai venytysmuovattaviin osiin suunnitellessa lävistyksiä tulee muistaa, että materiaalia muovataan valmistuksen aikana. Lävistyksen tulisi suunnitella suoritettavaksi vasta muovausprosessin jälkeen suoritettavaksi. Ennalta lävistettävät muodot tulisi sijoittaa kohtiin, joissa muovausta ei tapahdu, kuten laippoihin. Jäykisteitä käytetään myös muovattavissa kappaleissa, koska suorissa seinämissä esiintyy lommahtamis vaara. Jäykisteitä tulisi harkita suunniteltavaksi mieluummin pohjapintoihin, kuin vedon suuntaisiin pintoihin. Kuitenkin, jos jäykisteet suunnitellaan seinämiin, tulisi ulkonäkösyiden vuoksi suunnitella jäykisteet korvattavaksi kaksoiskaarevilla muodoilla. (Matilainen et. al, 2011, s. 229–230).

3.2.3 Ohutlevyjen taivuttamisen suunnittelu

Taivutettaessa ohutlevyjä tulee muistaa, että levyaihiassa tapahtuu elastisia- ja plastisia muodonmuutoksia. Levyn taivutuskohdassa sisälaidassa levyt tyssäntyvät ja ulkolaidassa levyt venyvät. Levyn ulkolaidoissa tapahtuu plastista muodonmuutosta, mikä mahdollistaa levyn muodonmuutokset. Kuitenkin levyn sisälaidan puristusjännitysvyöhykkeen ja ulkolaidan vetojännitysvyöhykkeen väliin jää, levyn keskiosaan, alue, jossa tapahtuu vain elastismuodonmuutosta. Tällä alueella ilmenee sisäisiä jännityksiä, jotka mahdollistavat takaisinjousto ilmiön. Takaisinjoustossa kappale pyrkii sisäisten jännityksien johdolla palautumaan alkuperäiseen muotoonsa, mutta samaan aikaan plastiset muodonmuutokset levyn ulkolaidoissa pyrkivät estämään sen. Joten tuloksena on levyn takaisinjousto missä taivutus pyrkii palautumaan normaaliin tilaan ja taivutuskulma jää tällöin vajaaksi aiotusta kulmasta. Takaisinjousto tulee olla arvioituna hyvässä suunnittelussa ja takaisinjoustoon vaikuttavia tekijöitä ovat taivutuslaitteistot ja levyn materiaali. Taivutuslaitteistosta suurimmat vaikutukset takaisinjoustoon antavat v-aukon leveys ja painimen säde. Lujat

materiaalit ovat helpommin takaisin joustavia kuin normaali lujat materiaalit. Myös ohuemmat levyt taipuvat ja pysyvät muodossaan helpommin. (Matilainen et. al, 2011, s. 245–256).

Suunnittelijan tulee myös huomioida, että yli 90 asteen kulmat takaisijoustavat helpommin ja sen takia tällaisia kulmia tulisi välttää taivutettavissa rakenteissa. Suunnittelijan tulisi suosia suunnitelmissaan yleisimpiin kulman taivutusasteisiin, sillä erikoisempien kulmien käyttäminen taivutuksessa kasvattaa valmistuksen viemää aikaa. Tämä johtuu siitä, että vakiotyökalujen asetuksia tulee muuttaa, mikäli kulmat eivät ole yleisimpiä 135, 90 tai 45 asteen kulmia. Muiden kulmien käyttäminen rakenteissa tulee olla hyvin perusteltuja. Esimerkkinä voidaan nostaa erikoisesta kulmasta särmäyspuristimella tehtävä litistys. Tässä taivutusprosessissa suoritetaan 180 asteen taittaminen levyyn. Tätä taivutusta varten tarvitaan erikoistyökalut. Vapaataivutuksenomaisessa litistystaivutuksessa taivutettavan laipan ja pohjalevyn väliin jätetään pieni ilmarako. Pohjaaniskutaivutuksessa laippa ja pohjalevy litistetään kiinni toisiinsa, jolloin murtumisvaara litistykseen taiveessa on suurempi. (Matilainen et. al, 2011, s. 245–256).

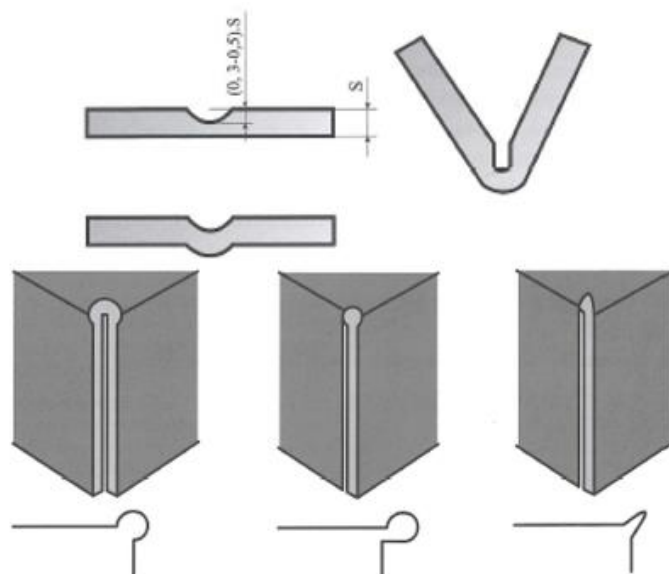
Muodonmuutokset ohutlevyn rakenteessa vaikuttavat myös valittavaan levyaihion oikaistuun pituuteen. Suunnittelijan tulee huomioida, kuinka paljon levyä taivuttaessa muodonmuutosta rakenteeseen tapahtuu, jotta hän osaa valita oikean levyaihion, jota taivuttaa. Oikaistun pituuden määrittämiseen käytetään neutraaliakselia, joka jää veto- ja puristusjännityksen muodostamien alueiden väliin. Neutraaliakseli ei kuitenkaan ole levyn keskiakseli, sillä taivutettaessa levyä neutraaliakselissa tapahtuu siirtymä kohti sisälaitaa. Moderneissa mallinnusohjelmissa oikaistunpituus kyetään määrittelemään automaattisesti. Mallinnusohjelmissa kyetään oikaistunpituuden lisäksi muuntamaan valmis taivuteltu rakenne levityskuvaksi. Levityskuva tarvitaan aina ohutlevytuotteiden valmistamiseen. Suunnittelijan tulee määrittellä suunnitellessaan taivutuksia oikaistunpituuden lisäksi laippojen korkeus ja taivutussäde. Laippojen korkeudessa, jokaiselle levyaihion paksuudelle on määritelty erikseen minimilaipankorkeus. Taulukossa 1 nähdäänkin teräsohutlevyjen eri paksuuksille minimiarvoja ja suositeltavia arvoja laipankorkeuksiin. (Matilainen et. al, 2011, s. 245–256).

Taulukko 1. Teräsohutlevyjen paksuuksien minimi ja suositeltavat laippakorkeudet (Matilainen et. al, 2011, s. 249).

Levyn paksuus s [mm]	Laippakorkeus b [mm]	
	Minimi	Suosittelava
0,50	1,50	2,80
0,75	2,30	4,70
1,00	3,00	5,60
1,25	3,80	6,80
1,50	4,50	9,40
2,00	6,00	10,60
2,50	7,50	14,00
3,00	9,00	17,00

Suunnittelijan tulee muistaa myös, että liian korkeat taivutettavat seinämät ovat vaikeasti taivutettavissa. Taivutettavuus riippuu käytettävissä olevasta taivutuslaitteistosta ja sen työkaluista. Suunnittelijan tulisi muistaa nyrkkisääntönä korkeudelle, että kun kappaletta katsotaan 45 asteen kulmasta, tulisi sen sisäpohjan taivutuksen vielä näkyä. Suljettuja muotoja tulisi suunnittelijan pyrkiä välttelemään taivuttamisen vaikeuden takia. Erittäin syvät tai suljetut profiilit saattavat tarvita erikoistyökaluja, jotta taivutus voidaan toteuttaa. Tärkeää on myös huomioida suunnitellessa suljettuja, kotelomaisia ja syviä rakenteita, että työkaluilla on tarpeeksi tilaa suorittaa taivutus. Sen takia suunnittelija tulee suunnitella mieluummin avonaisia rakenteita, joissa ei ole vaaraa työkalun törmäyksille taivutusprosessissa. (Matilainen et. al, 2011, s. 245–256).

Normaaleja työkaluja käyttämällä taivutussäde tulisi ohutlevyissä olla minimissään levynpaksuuden verran. Venytysjännitys taivutuksen ulkoreunassa kasvaa sitä suuremmaksi mitä pienempi sisätaivutussäde ohutlevyissä on. Tällöin syntyy kappaleen ulkoreunaan murtumisvaara. Jos halutaan tehdä pienempi taivutussäteisiä taittoja, voidaan ne toteuttaa tekemällä ohutlevyyn lovi tai vako taivutus kohtaan. Jos taivutettavaan rakenteeseen suunnitellaan nurkkia, joissa taivutukset kohtaavat, tulisi näihin kohtiin suunnitella helpotuksia, jotka estävät repeämisiä. Helpotuksia on pyöreitä, neliömäisiä tai kyöneleen muotoisia ja niiden kokoja kyetään vaihtelevaan tarpeen mukaan. Kuvassa 16 esitetään taivutuslinjan helpotukset lovi ja vako, sekä nurkkiin sijoitettavat erilaiset helpotukset. (Matilainen et. al, 2011, s. 245–256).

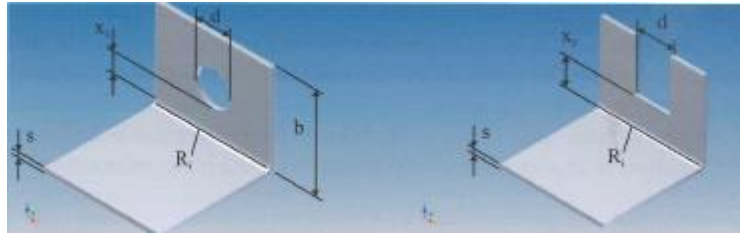


Kuva 16. Helpotukset taivutuslinjassa (lovi ja vako) ylempänä kuvassa ja alempana erilaisia nurkkahelpotuksia muok. (Matilainen et. al, 2011, s. 249–259).

Taivutuksessa voidaan suunnitella, jokaisella taivutusmenetelmällä valmistettavan, tuotteen tarkkuudeksi $\pm 0,5$ millimetriä. Kokonaistarkkuus määrittyy tuotteelta vaadituista tarkkuuksista; taivutuksen sijainti ja taivutuksen kohta. Taivutuksen mitta ja valmistustarkkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat materiaaliominaisuudet, takaisinjousto, taivutuskulman tarkkuus, taivutus särmän suoruus, kitka, työkalut, vapaataivutuksessa vastimen uran ja painimen kärkisäteen suhde, aihion paksuus, sekä leveys. Suunnittelijan tulee ennakoida, että taivutuksessa voi syntyä epätarkkuuksia. Tämän vuoksi on tärkeää, että suunnittelija merkitsee valmistuskuviin valmistettavien osien kriittiset kohdat ja mitat, sekä kohdat joihin epätarkkuudet voivat jäädä. (Matilainen et. al, 2011, s. 253–258).

Taivutuksen kohtaa ei tulisi sijoittaa levyn reunan myötäisesti, sillä materiaali venyy ja puristuu taivutuksen lähelläkin. Jos taivutuslinja on sijoitettava levyn reunan myötäisesti, tulisi taivutuksen ja taivuttamattoman kohdan väliin suunnitella helpotukset, esimerkiksi lovi tai pykällys. Liian lähelle taivutuslinjaa ei tulisi sijoittaa mitään muotoja, jotka voivat alistua muodonmuutokselle taivutusprosessissa. Tämä koskee myös lävistyksiä ja reikiä, sekä laipan sivuja, joiden tulee olla kohtisuorassa taivutuslinjaa kohden, muuten laipan sivun kulmat voivat kärsiä muodonmuutoksesta. Lävistyksien ja reikien minimietäisyyttä taivutuksesta kyetään laskemaan kaavoilla 1 ympyräreille ja 2 loville. Kaavoissa d on reiän tai loven halkaisija, s on levyn paksuus, R on taivutuksen sisäsäde ja b on laipan sivun pituus.

Kuvassa 17 nähdään havainnollistavat esimerkkitalanteet reikien minimietäisyyksien laskemiseksi ympyräreiästä ja lovesta. (Matilainen et. al, 2011, s. 257–258).



Kuva 17. Minimietäisyydet rei'ille ja loville taivutuksien suhteen (Matilainen et. al, 2011, s. 258).

$$x_1 = \sqrt{d * s} + 0,8R * \sqrt{\frac{b}{d}} \quad (1)$$

$$x_2 = 1,1\sqrt{d * s} + 0,8R * \sqrt{\frac{b}{d}} \quad (2)$$

Taivutusprosessin helpottamiseksi suunnittelijoiden tulee harkita taivutettavien osien yksinkertaistamista ja taivuttamisen helpottavia erikoismenetelmiä. Yksinkertaistamista voidaan toteuttaa taivutettavissa osissa niin, että taivutuksia symmetrisoidaan tai mitoitetaan samanlaisiksi. Symmetrisoimisella taivutuksia, taivutusprosessissa kyetään käyttämään samoja työkaluja ja taivutuslaitteiston asetuksia. Työkaluasetuksia voidaan myös helpottaa suunnittelemalla kaikki taivutuksen taivutuslinjan yhtä pitkiksi. Taivutusprosessia kyetään myös helpottamaan erikoismenetelmillä kuten, kampataivutus ja apukantinkäyttö. Kampataivutuksessa vakio työkaluasetuksia käytetään pienten, mikrokiinnikkeillä toisiinsa kiinnitettyjen osien, samanaikaiseen taivuttamiseen. Mikrokiinnikkeillä toisiinsa kiinnitetyt osat voidaan irrottaa toisistaan taivutuksen jälkeen ja näin säästetään taivutusprosessissa aikaa. Samanlaista mikrokiinnikkeiden käyttöä suositaan apukantin käytössä, millä helpotetaan vinojen reunojen omaavien osien taivuttamista. Vanhoissa särmäyspuristimissa ei ole välttämättä mahdollisuutta suorittaa vinoa särmäämistä. Tällöin voidaan käyttää apuna mikrokiinnikkeillä kiinni olevaa apukantia, jossa on suora reuna, mikä laitetaan takavastetta vasten. Näin voidaan synnyttää suora taittolinja vanhan aikaisella särmäyspuristimella, jonka jälkeen apukantti kyetään irrottamaan käsin taitetusta osasta. (Matilainen et. al, 2011, s. 255–266).

4 ILMANVAIHTOKONEEN SUUNNITELUN PIIRTEET

Diplomityö suoritettiin Lappeenrannan teknillisellä yliopistolla. Tutkimuksen tarve ilmaantui kohdeyritykseltä, jonka tarkoituksen on uudistaa heidän tuotettaan, joka on ilmanvaihtokone. Kohdeyrityksessä on suoritettu suuria uudistuksia jo tuotannon puolella ja tarkoitus olikin suorittaa tuotteen uudistusta yliopistolta saadun avustuksen kanssa. Tutkimuksen tarkoituksena on suorittaa olemassa olevan tuotteen käänteinen suunnittelu (RE), jossa tuotteen ohutlevyosista koostuva runkorakenne tullaan mallintamaan 3D-CAD SolidWorks ohjelmistolla, tuotteen osien ja kokoonpanon analysointi DFMA näkökulmista, mallintaa uudistusehdotukset tuotteen rakenteesta ja vertailla muutoksia aiempaan rakenteeseen. Uudistuksen mukaisesta rakenteesta on tarkoitus myös luoda prototyyppi, jolla kyetään testaamaan uudistuksien toimivuuksia. Kaikki informaatio ilmanvaihtokoneen rakenteesta, toimivuudesta, kokoonpanosta ja valmistamisesta on saatu kohdeyrityksen haastatteluissa ja yritysvierailuilla. Myös kuvat 18–21 on kohdeyrityksen materiaaleista saatuja.

4.1 Ilmanvaihtokone

Kohdeyrityksen ilmanvaihtokone on tarkoitettu pienempiin asuintiloihin, esimerkiksi kerrostaloasuntoihin ja muihin pieniin tiloihin. Ilmanvaihtokone voidaan asentaa, joko seinälle tai kattoon, mutta laite tulee asentaa yli 5 °C asteen lämpöiseen tilaan. Ilmanvaihtokone voidaan asentaa erillisenä yksikkönä tai se voidaan yhdistää liesikuvun kanssa, joko yhteiseksi kokonaisuudeksi tai irralliseksi yksiköksi, joka johdetaan kanavilla liesikupuun. Ilmanvaihtokonetta voidaan myös yhdistellä ulkoisiin ilmanvaihdon ohjauksiin. Ilmanvaihtokonetta saa sekä oikea, että vasenkätisinä. Painoa ilmanvaihtokoneella on 60 kilogrammaa. Ohjausjärjestelmä vaihtoehtoja on kaksi erilaista ohjausjärjestelmää. Näillä ohjausjärjestelmillä kyetään ohjaamaan ilmanvaihtokoneen puhallinnopeutta (4-portainen), tuloilman lämpötilaa, ylipaineistus, jälkilämmitystä, lämmöntalteenottoa ja ne ilmoittavat LED-valoilla, milloin on tarve suodattimien vaihdolle, sekä huollolle. Ohjausjärjestelmistä toinen on kehittyneempi, jossa on mukana anturitekniikkaa, jolla hallitaan kosteustehostusta, ja eco-energian säästötila. Kuvassa 18 nähdään vasen kätinen ilmanvaihtokone ilman ovea, jolloin nähdään sen sisätilat.

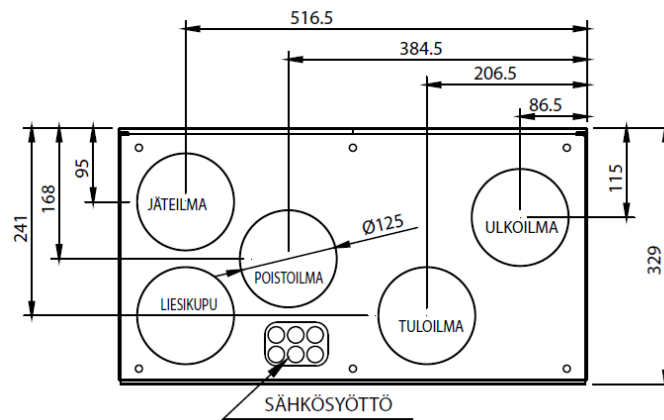


Kuva 18. Yrityksen ilmanvaihtokone vasen kätisenä (ilman ovea).

4.1.1 Ilmanvaihtokoneen toiminta

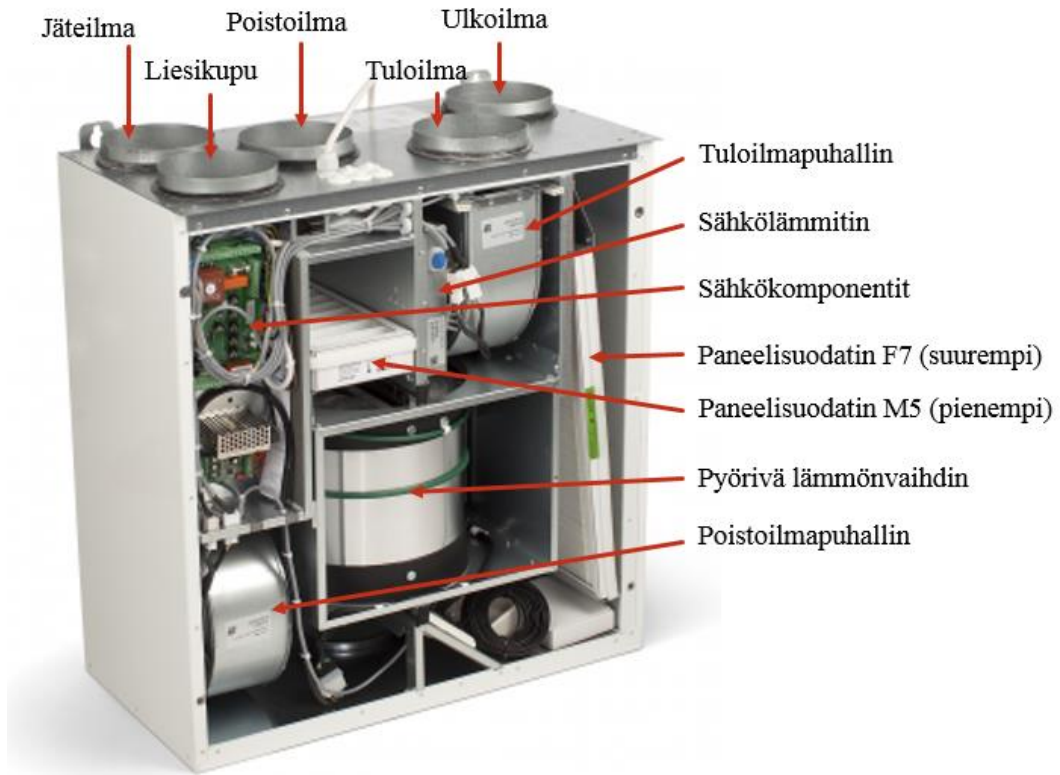
Ilmanvaihtokonetta mainostetaan hiljaisena ilmanvaihtokoneena. Tämän takia ilmanvaihtokoneen toiminnan kannalta ilmanvaihtokoneen käyntiäänien hiljaisuus on sen yksi kriittisistä vaatimuksista. Toinen kriittinen ominaisuus ilmanvaihtokoneen toiminnassa on sen tiiviys. Ilmanvaihtokoneen mallissa sisäisiksi ja ulkoisiksi vuotoprosenteiksi tulee saada alle 5 %. Ilmanvaihtokoneen katolla on 5 eri ilmakanavaa, joista ilma ohjataan laitteiston läpi. Jokaisella ilmakanavalla on oma toimintansa ja jokainen ilmakanava omaa laitteistossa oman osionsa, millä on oma ominainen tehtävä laitteessa. Ilmakanavia ilmanvaihtokoneessa ovat ulkoilma, tuloilma, poistoilma, jäteilma ja liesikuvun kanava. Kuvassa 19 nähdään, jokainen eri ilmakanava oikeakätisessä ilmanvaihtokoneessa. Laitteiston toiminnan kannalta on kriittistä tunnistaa, mikä ilmavirta kulkee missäkin laitteiston osiossa.

OIKEA



Kuva 19. Ilmanvaihtokoneen ilman kierto putkistossa (oikea käsinen ilmanvaihtokone).

Kriittisimpiä osakokonaisuuksia, laitteiston toiminnan kannalta, ilmanvaihtokoneessa ovat tulo- ja poistoilman puhaltimet, pyörivälämmön vaihdin ja sen kenno moottori, kaksi vakiosuodatinta, sähkölämmitin, sekä sähköiset automatiikkakomponentit. Molemmat puhaltimet laitteistossa ovat kaavullisia keskipakopuhaltimia, jotka imevät yhdeltä puolelta. Ilmanvaihtokoneessa on alumiininen pyörivä lämmönvaihdin, johon on kytketty kennomoottori. Kennomoottorin teho välitetään pyörivään lämmönvaihtimeen vihreällä polyuretaani-hihnalla. Vakiosuodattimet ovat paneelisuodattimia, joista toinen on suurempi ja sijaitsee ulkoilmakanavan alapuolella (F7 mallinen). Pienempi paneelisuodatin on M5 mallinen ja sijaitsee poistoilmakanavan alapuolella. Vakio sähköinen jälkilämmitin sijaitsee tuloilmakanavan alapuolella. Kuvassa 20 on havainnollistava kuva, missä nähdään ilmakehien sijainnit suhteessa kriittisiin kokonaisuuksiin.



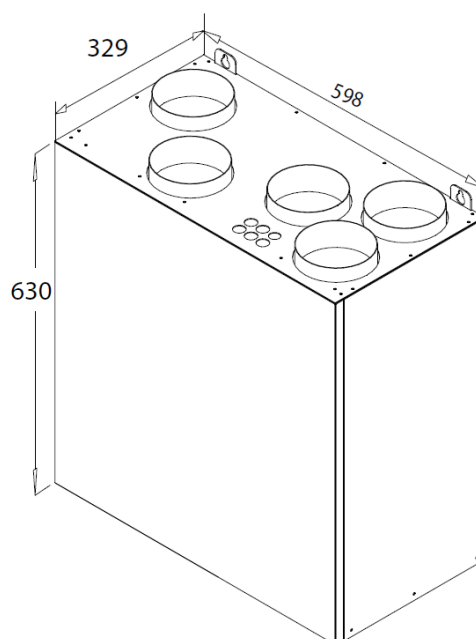
Kuva 20. Ilmakanavien ja kriittisten kokonaisuuksien sijainnit laitteistossa (oikea käsin laitteisto).

Ilmanvaihtokoneen, jonka tehtävänä on kierrättää ja laadullisesti ylläpitää huoneilmaa asunnoissa, toiminnassa tärkeimmät osiot ovat poisto- ja tuloilmakanavat. Poistoilmakanavasta tulee asunnosta poistettava ilma ja tuloilma kanava korvaa poistettavan ilman tuoreella ilmalla. (Korkala, Laksola & Salminen 2002, s. 39–42) Poistoilmakanavasta tuleva ilma kulkee paneelisuodattimen (M5 malli) läpi pyörivään lämmönvaihtimeen. Paneelisuodattimen ja pyörivän lämmönvaihtimen välissä sijaitsee anturi, jolla mitataan poistoilman lämpötilaa. Pyörivässä lämmönvaihtimessa poistoilman lämpöenergiaa otetaan talteen lämmönvaihtimen kennomaisella pinnalla. Pyörivä lämmönvaihdin siirtää poistoilmasta saadun lämpöenergian väliseinän toiselle puolelle tuloilmakanavan osioon. Tuloilmassa pyritään hyväksikäyttämään poistoilman lämpöenergiaa ja ulkoilman tuoreutta (Korkala, Laksola & Salminen 2002, s. 39–42). Tuloilmakanavassa sijaitsee myös sähköinen jälkilämmitin millä kyetään lämmittämään tuloilmaa haluttuun lämpötilaan, jos se on haluttua kylmempää. Tuloilmapuhallin puhalttaa tuloilman tuloilmakanavaa pitkin asuntoon. Ilmanvaihtokoneen toiminnan kannalta on siis kriittistä, että poisto- ja tuloilmakanavan osiot ovat hyvin tiivistettyjä suhteessaan toisiinsa.

Ulkoilmakanavasta virtaa laitteistoon ilmaa asunnon ulkopuolelta. Tässä laitteiston osiossa lämpötilat voivat vaihdella suomen ilmastossa -40 °C asteesta aina $+40\text{ °C}$ asteeseen. Tämän vuoksi ulkoilmakanavan alapuolinen laitteiston osion tulee olla hyvin lämpöeristetty. Laitteiston ulkoilmakanavan osiosta löytyy suurempi paneelisuodatin (F7 malli), jonka läpi tuleva ulkoilma suodattuu. Suodattimen jälkeen ulkoilma siirtyy pyörivään lämmönvaihtimeen. Lämmönvaihtimen ala puoli on myös jaettu kahteen eri osioon, joiden tulee olla hyvin tiivistettyjä toistensa suhteen. Liesikuvun tulokanava liitetään ilmanvaihtokoneen ala osaan keskelle laitetta. Liesikuvusta tulevalle ilma kulkeutuu samaan tilaan, jossa on poistoilmapuhallin. Poistoilmapuhallin kerää pyörivästä lämmönvaihtimesta ja liesikuvusta tulevan ilman ja puhalttaa sen jäteilmakanavan kautta pois asunnosta.

4.1.2 Ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakenne

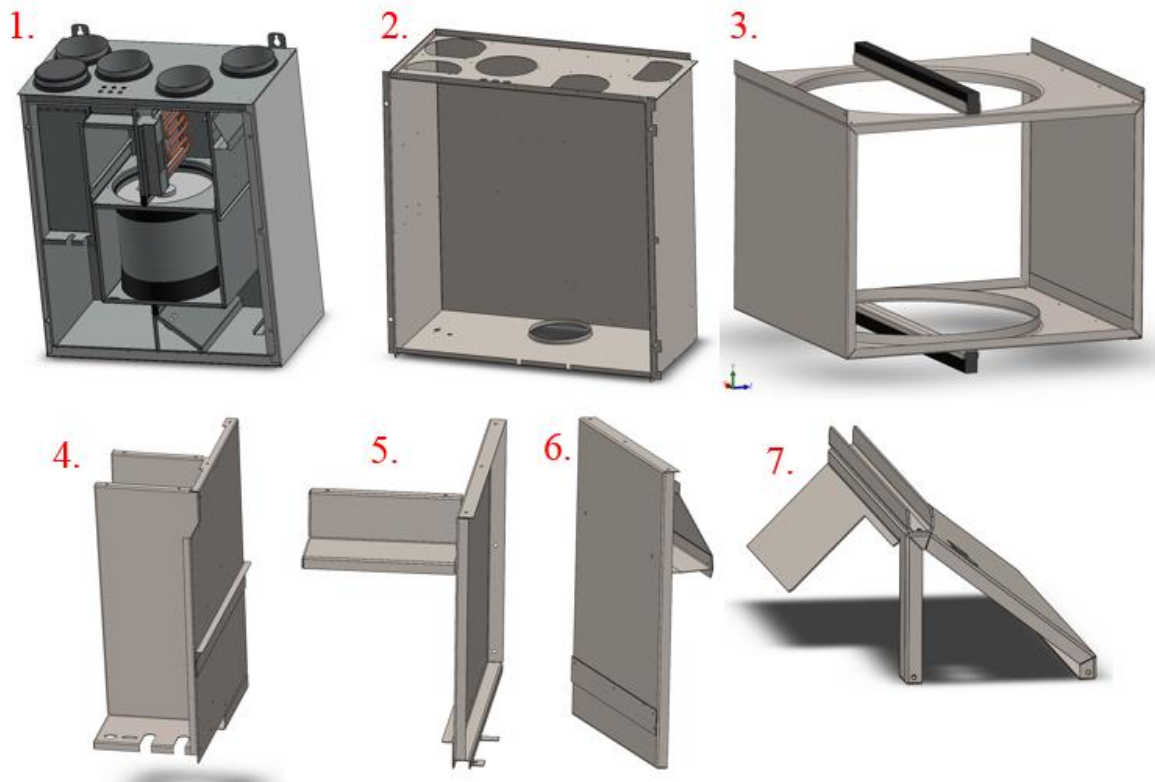
Ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakenne koostuu sinkitystä teräslevyistä, joiden paksuus vaihtelee $0,7 - 2\text{ mm}$. Koko rakenteesta tässä tutkimuksessa otetaan tarkasteluun 43 ohutlevy tai PVC-muovi osaa. Ulkokuori, ulkokuoren pohja ja ulkokuoren ovi osat ovat $1,25\text{ mm}$ paksuisia, sekä ne on jauhemaalattu valkoisiksi. Ulkokuoren kokoonpanon ulkoiset äärimitat ovat kriittisiä ilmanvaihtokoneen toiminnallisuuden kannalta. Ilmanvaihtokoneen tulee pysyä pienenä ja ulkokuoren mittoja ei kyetä kasvattamaan. Kuvassa 21 nähdään ilmanvaihtokoneen ulkoiset äärimitat jaoteltuna. Äärimitat ovat millimetreinä (korkeus 630 mm , leveys 598 mm ja paksuus 329 mm).



Kuva 21. Ilmanvaihtokoneen ulkoiset äärimitat.

Kuvassa 22 on nähtävissä ilmanvaihtokoneen ohutlevyrunko kokonaisuudessaan kohdassa 1. Kuvassa jaotellaan myös ohutlevyrunko osakokonaisuuksiin, jotka havainnollistavat sen rakennetta. Ilmanvaihtokoneessa on sisäkuoren vaippa, joka on paksuudeltaan 1,5 mm. Tähän osaan kiinnitetään sisäkuoren pohja ja katto (kuvassa 22 kohta 2), melkein kaikki ohutlevykokonaisuudet, sekä tuetaan pyörivän lämmönvaihtimen ympäriset ohutlevyosat (kuvassa 22 kohta 3). Tähän sisäkuoreen kiinnitettävät ohutlevyosakokonaisuuksia ovat poistoilmapuhaltimen yläpuolinen osakokonaisuus, joka koostuu kuudesta eri osasta (kuvassa 22 kohta 4). Lämmönvaihtimen yläosan kahtia jakava keskiväliseinän osakokonaisuus, joka koostuu kolmesta eri osasta (kuvassa 22 kohta 5). Ulkoilmakanavasta tulevan ilman eristävä väliseinä kokonaisuus, joka koostuu viidestä eri osasta (kuvassa 22 kohta 6). Lämmönvaihtimen ympäröivä osakokonaisuus, joka koostuu viidestä eri ohutlevyosasta ja lämmönvaihtimen alapuolen kahtia jakavasta väliseinä osakokonaisuudesta, joka koostuu kahdesta osasta (kuvassa 22 kohta 7). Suurin osa näistä osakokonaisuuksista rakentuu 0,75 mm paksuisista ohutlevyistä. Eroavaisuuksia löytyy 1 mm paksuisesta sähköisen automatiikan takaisesta levystä, pehmusteiden 1,5 mm paksuisista c-kiskoista, 1,5 mm paksuista puhaltimien tukilevyistä ja ulkokuoren kiinnittävistä 2 mm paksuisista korvakeista. Tarkasteltavaan rakenteeseen on myös huomioitu PVC-muovista valmistetut 2 mm paksuiset kylmäsiltaukset, jotka ovat ilmanvaihtokoneen toiminnan

kannalta kriittisiä. Ne eristävät lämpötilojen vaihtelun johtumisen sisäosista ulkokuoren osiin.



Kuva 22. Ilmanvaihtokoneen ohutlevyrunko (1.) ja sen eri osakokonaisuudet (2-7.).

4.1.3 Ilmanvaihtokoneen valmistus ja kokoonpano

Tämän työn kohdeyrityksen organisaation toiminnassa ohutlevyosat ovat alihankittuja toimijoilta ja kohdeyritys, itse toteuttaa ilmanvaihtokoneen kokoonpanoprosessin. Tämän tutkimuksen kannalta on siis tärkeää keskittyä ilmanvaihtokoneen kokoonpantavuuteen, kuitenkin valmistusmenetelmiä unohtamatta. Seuraavaksi käydään läpi tuotteen valmistus ja kokoonpanoprosessit ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakennetta valmistaessa.

Ilmanvaihtokoneen ohutlevyosien valmistuksessa käytetään levytyökeskuksia, joissa on laserleikkauspää integroituna levytyökeskukseen. Leikkausmenetelmiä ilmanvaihtokoneen osien valmistuksessa ovat siis laserleikkaus ja lävistys. Osissa ilmenee monia särmäyksiä, jotka ovat monimutkaisia, korkeita ja erisuuntaisia muihin särmäyksiin. Tämän vuoksi taivuttamisprosesseissa käytetään särmäyspuristinta, jolla nämä taitot onnistuvat. Ohutlevyrakenteessa esiintyy myös muovattuja osia. Syväveto muovausmenetelmää

käytetään ilmanvaihtokanavien lähtökauluksissa, jotka ovat katossa, pyörivän lämmönvaihtimen ylä- ja alapuolisen levyjen kauluksien vetämisessä ja sisäkuoren pohjan kauluksen vetämisessä. Edellä mainitut valmistusmenetelmät suoritetaan osien toimittajien tiloissa. Kohdeyrityksen toiminnassa tuote kokoonpannaan liittämismenetelmillä, tiivistetään uretaanilla, eristetään solumuovilla ja katon lähtökauluksia leikataan muotoon peltisaksilla. Tärkeimmät liittämismenetelmät ohutlevyrakenteen kokoonpano vaiheessa ovat pistehitsaus sisäkaton ja lähtökauluksen liittämässä, sekä vetoniitti- ja ruuvikiinnitykset muissa kohteissa.

Kohdeyrityksen tehtaalla kokoonpano aloitetaan kuvan 22 mukaisilla (3-7) osakokonaisuuksien ja sisäkaton osakokonaisuuden kokoonpanolla. Osakokonaisuudet 4-7 kuvassa 20 liitetään kokoon niittausliitoksilla. Jokaiseen osakokonaisuuteen liitetään myös solumuovitiivisteet solumuovitiivisteissä olevalla liimapinnalla. Osakokonaisuus 3 kasataan erillään muista osakokonaisuuksista, koska siihen kiinnitetään kennonmoottori ja sivulevyt ruuveilla toisiinsa. Kuvassa 23 nähdään sisäkaton osakokoonpano, joka koostuu lähtökauluksista, sisäkatosta, oven sensorin tuesta ja tuloilmapuhaltimen tukilevystä. Sisäkattoon liitetään, muotoon leikatut lähtökaulukset pistehitsauksella, sekä lähtökaulukset tiivistetään tiivistemassalla, ettei vuotoja tapahdu sisäkattoon. Kun lähtökaulukset on pistehitsattu sisäkattoon ja tiivistetty tulee sisäkaton ja väliseinien niittien reikien reiät porata auki lähtökauluksiin. Sisäkattoon liitetään myös tuloilmapuhaltimen tuki, joka myös tiivistetään tiivistemassalla, niittauksilla. Kohdeyrityksen toiminnassa tämä operaatio on eniten aikaa vievä prosessi, joka nostetaan yksi tärkeimmistä uudelleensuunnittelun kohteista tässä kokoonpanossa.

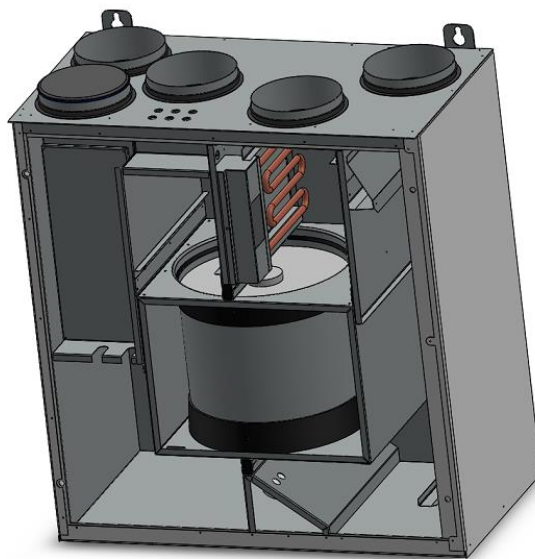


Kuva 23. Sisäkaton osakokoonpano kokoonpantuna.

Kuvan 22 mukaiset osakokoonpanot 4-7 kokoonpannaan eri kokoonpano pisteellä, kuin sisäkaton osakokoonpano ja osakokoonpano 3, joten nämä kokoonpanot suoritetaan samaan aikaan. Kun edellä mainitut osakokoonpanot on kokoonpantu, siirretään ne yhdelle kokoonpano pisteelle, missä ohutlevyrunko kokoonpannaan valmiiksi, paitsi osakokoonpano 3. Tämä kokoonpano vaihe alkaa ulkokuoren pohjan ja sen eristeiden, sekä liittimien kokoonpanolla. Ulkokuoren pohjan päälle sijoitetaan sitten sisäkuoren vaippa, johon kiinnitetään sisäkuoren pohja. Sisäkuoren pohja kiinnittyy ulkokuoren pohjaan valkoisilla vetoniiteillä ja niiden väliin sijoitetaan PVC-muovinen valkoinen kylmäsiilakatkko. Tämän jälkeen sisäkuoreen kiinnitetään kuvan 22 mukaiset osakokonaisuudet 4, 5, 6 ja 7 juuri kyseisessä järjestyksessä. Muita liitettäviä osia, jotka eivät kuulu osakokoonpanoihin on kaksi kappaletta ja ne liitetään sisäkuoreen samanaikaisesti osakokonaisuuksien kanssa. Niittausliitos toteutetaan ilmapaineistetulla niittauslaitteella ja varavälineenä toimii manuaalinen niittipistooli. Kun osakokonaisuudet 4-7 on liitetty sisäkuoreen ja tiivistetty tiivistemassalla, liitetään sisäkaton osakokoonpano sisäkuoreen ja väliseiniin niiteillä. Tämän jälkeen sisäkuori ja sisäkatto eristetään vielä solumuoveilla. Sen jälkeen liitetään loput PVC-muoviset valkoiset kylmäsiilakatkot sisäkuoren ja sisäkaton etusärmiin. Nyt voidaan liittää ulkokuoren pohjaan ulkokuori, johon on niitattuna valmiiksi korvakkeet. Viimeisimpänä ohutlevyosana kokoonpanossa asennetaan ulkokuoren katto paikoilleen niiteillä. Tämän jälkeen kokoonpanossa siirrytään kriittisten osakokonaisuuksien asentamiseen toiselle kokoonpanopisteelle missä asennetaan muun muassa kuvan 22 mukainen osakokonaisuus 3, johon on paikoilleen asennettuna pyörivä lämmönvaihdin ja kenno moottori. Tässä kokoonpano pisteessä asennetaan myös sähkölämmitin, puhaltimet, suodattimet ja suoritetaan viimeiset tiivistykset, sekä oven asentaminen neljällä ruuvilla.

4.2 Ilmanvaihtokoneen 3D-mallinnus

Ensimmäinen työn vaihe käänteisessä suunnittelussa (RE) oli suorittaa ilmanvaihtokoneen 3D-mallinnus SolidWorks-ohjelmalla. 3D-mallinnus suoritettiin apuna käyttäen yrityksen toimittamia DWG-tiedostoa ilmanvaihtokoneen etuosasta, mistä saatiin kaksiulotteiset mitat ilmanvaihtokoneesta, fyysistä ilmanvaihtokonetta ja melkein kaikki ilmanvaihtokoneen irralliset ohutlevyosat. Tarkempaa mitoitusyötä osista suoritettiin työntö- ja rullamitalla, jonka jälkeen luotiin 3D-malli ilmanvaihtokoneen ohutlevyrungosta. Ohutlevyrungon, jokainen osa mallinnettiin erikseen ja mallinnettujen osien määrä on 39 kappaletta. Jokainen näistä mallinnetuista osista on nähtävissä liitteessä II. 3D-mallinnukset on esitetty liitteessä II, niin että sivujen vasemmassa laidassa esiintyy hiukan pienempänä nykyinen osan malli. Sivujen oikealle puolelle on laitettu isompana uudelleen suunniteltu osa. Kuvassa 24 voidaan nähdä 3D-mallinnettu ohutlevyrunko kokoonpano.



Kuva 24. 3D-mallinnettu ilmanvaihtokoneen ohutlevyrunko ja kuvitteellinen pyörivä lämmönvaihdin, sekä sähkölämmitin.

5 ILMANVAIHTOKONEEN DFMA: N MUKAINEN UDELLEEN SUUNNITTELU

Ilmanvaihtokoneen uudelleensuunnittelussa on pyritty muokkaamaan ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakennetta yrityksen toiveiden, valmistuksen ja kokoonpanon rajoitusten mukaisesti. Yrityksen toiminnassa kokoonpano on suuressa osassa ja sen rajoituksia, sekä helpotuksia tulee noudattaa uudelleen suunnittelussa. Yrityksen kokoonpanovalmius on huomioitu uudelleensuunnittelussa ja kokoonpanoa pyritään muuttamaan, niin ettei tuotteen valmistamisessa tapahdu radikaaleja muutoksia. Uudelleen suunnittelussa huomioidaan kaikki tässä työssä edellä mainitut ohutlevyjen suunnittelusäännöt, sekä DFMA:n mukaiset toimenpiteet.

Kokoonpanossa on 180 vetoniittiä ja tämän korkean vetoniittien osamäärän vuoksi on kokoonpanoon harkittu uusia kiinnitysmetodeja. Myös osien valmistusmenetelmiä on kyetty suunnittelemaan uudelleen, niin ettei se tulisi muuttamaan yrityksen nykyistä toimintaa radikaalisti. Kaikista uudelleen suunnittelun vaiheista on keskusteltu kohdeyrityksen kanssa työn välipalaverissa.

Työssä tullaan käsittelemään osakokonaisuuksien, sekä yksittäisten osien kokoonpano- ja valmistusystävällisyyttä. Erillisiä käsiteltäviä osakokonaisuuksia työssä ovat ulkokuoren, sisäkuoren, sisäosakokonaisuudet ja sisäkaton osakokonaisuus. Liitteessä II esitellään sivulla 1 taulukko, jossa on jokainen ohutlevyrunгон analysoitava osa. Liitteen II sivun 1 taulukossa esitetään, jokainen nykyinen osa tummalla pohjalla, sekä uudistetun kokoonpanon osat vaalealla pohjalla. Käsiteltävien osien lukumäärä nykyisessä kokoonpanossa on 44 kappaletta. Osien kriittisyyttä on analysoitu Lucaksen vuokaavion mukaan, mutta myös osan toiminnallisuutta ilmanvaihtokoneessa on huomioitu osien kriittisyyttä määriteässä. Kriittisyysmäärittely kautta on mietitty osien vähentämistä ja yksinkertaistamista kokoonpanosta.

5.1 Ilmanvaihtokoneen osakokonaisuuksien ja osien DFMA-analysointi

Uudelleen suunnittelu on aloitettu osakohtaisella DFMA-analyysillä. Tällä tarkoitetaan, että jokaisen osan kriittisyyttä rakenteen, toiminnan ja kokoonpanon kannalta on tarkoin

analysoitu. Lucaksen vuokaaviota on hyväksikäytetty osien kriittisyyden määrittelyssä. Kysymykset on esitetty jokaisen osan kohdalla ja sen pohjalta on määritelty osien kriittisyyttä. Kriittisyyden määrittelyyn on kuitenkin otettu huomioon osien kriittisyys toiminnallisuuden, kokoonpantavuuden ja tämän hetkisen rakenteet kannalta. Liitteessä I esitetään osien kriittisyyden analysointi taulukkona sivulla 2 ja sivulla 1 on vielä Lucaksen vuokaavio ja sen kysymykset numeroituna. Taulukossa esitetään Lucaksen vuokaavion numeroituihin kysymyksiin (1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B ja 3C) vastaukset. Tämän jälkeen pohdittiin, onko osa muuten kriittinen ilmanvaihtokoneen toiminnan kannalta.

Liitteen I sivun 1 taulukosta ilmenee, että ilmanvaihtokoneen ohutlevyrungossa on 17 kriittistä osaa. Näistä kriittisistä osista on 4 PVC-muovisia kylmäsiltakatkoja, joten voidaan sanoa, että 13 ohutlevyosaa on kriittisiä ilmanvaihtokoneen rungossa. Teoreettisesti ajateltuna ohutlevyrunko voisi koostua 13 ohutlevy osasta ja se on minimi määrä osia. Ohutlevyrunko koostuu tällä hetkellä 40 ohutlevy osasta. Lucas on luonut DFMA tutkimuksissaan kokoonpanon tehokkuutta laskevan kaavan ja se esitetään kaavassa 3. Kaavassa Aef tarkoittaa prosentuaalista kriittisten osien osuutta kaikista osista, A on kriittisten osien lukumäärä ja B on ei-kriittisten osien lukumäärä. Lucaksen luoman suunnittelun tehokkuuden laskukaavan pohjalta voidaan todeta, että nykyisen ilmanvaihtokoneen suunnittelun tehokkuuden prosentti on 32,5 % ($13 / (13 + 27)$). Käytännöllinen suunnittelun tehokkuus prosentti on määritelty 45 %. (Biesek & Ferreira 2016, s.707–709.) Tätä suunnittelun tehokkuus prosenttia pyritään uudelleen suunnittelussa parantamaan. Lucaksen luoma DFMA:n mukainen kokoonpanon tehokkuutta laskevan kaava (Biesek & Ferreira 2016, s.708.):

$$Aef = A/(A + B) \quad (3)$$

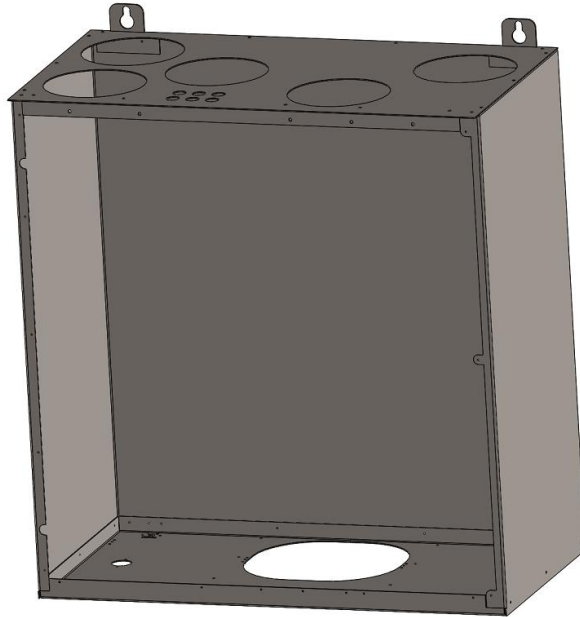
5.2 Ilmanvaihtokoneen osakokonaisuuksien ja osien uudelleen suunnittelu

Ilmanvaihtokoneen osat tullaan esittelemään osakokonaisuuksittain. Osakokonaisuuksista huomioidaan uudelleen suunnittelussa osien valmistus ja kokoonpano ominaisuudet. Liitteen II sivun 1 taulukossa on esitelty ohutlevyrungon kaikki osat. Siinä käydään läpi kaikkien osien ominaisuuksia ja niiden muutoksia. Vaalealla pohjalla esitetään uudelleen suunniteltujen osien ominaisuuksien määrät ja tummemmalla pohjalla esitetään nykyisen rakenteen osien ominaisuuksien määrät. Liitteessä II tullaan esittelemään myös, jokaisen

osan ominaisuudet erikseen taulukoissa kuvien alapuolella (nykyisen mallin arvot suluisissa). Uudelleen suunnitellut osat esitetään kuvina ja niistä nähdään, minkälaisia muutoksia osaan on ajateltu tehtävän. Liitteessä II esitellään nykyisen ilmanvaihtokoneen osat vasemmalla puolella hiukan uutta osaa pienempänä. Uudet osat on esitelty oikealla puolella. Vanhoista osista lähtee vielä vihreä havainnollistava nuoli, joka osoittaa nykyisestä mallista uutta mallia kohtaan.

5.2.1 Ulkokuoren osakokonaisuus ja sen osat

Ulkokuoren osakokoonpano koostuu ulkokuoresta, ulkokuoren ovesta, ulkokuoren pohjasta, ulkokuoren katto, katon kiinnityslista ja ulkokuoren kiinnityskorvakkeet. Ulkokuoren osakokoonpanosta ulkokuori, ulkokuoren ovi ja ulkokuoren pohja on jauhemaalattu valkoisiksi ilmanvaihtokoneen ulkonäöllisistä syistä. Ulkokuori ja ulkokuoren pohja on kiinnitetty toisiinsa taka- ja sivuseinämillä valkoisilla vetoniiteillä, joita on 14 kappaletta. Ulkokuoren ovi kiinnitetään neljällä ruuvilla koko ilmanvaihtokoneen kokoonpanoon, kun muu kokoonpaneminen on jo suoritettu. Ulkokuoreen kiinnitetään kaksi kiinnityskorvaketta kahdella niitillä, joilla toteutetaan ilmanvaihtokoneen kiinnitys paikoilleen yhdellä tapaa. Ulkokuoren katto, joka asennetaan ohutlevyrakenteeseen viimeisenä, kiinnitetään ulkokuoreen 12 vetoniitillä. Kuvassa 25 nähdään ulkokuoren osakokoonpanon kokonaisuus, jota ei kuitenkaan kokoonpanna tällaiseen muotoon. Kuvalla 25 pyritään esittämään ulkokuoren kokonaisuus ja osien mallit, jotka esitetään vielä tarkemmin liitteessä II, ulkokuori sivulla 3, ulkokuoren ovi sivulla 4, ulkokuoren pohja sivulla 6, ulkokuoren katto sivulla 5, katon kiinnityslista sivulla 8 ja ulkokuoren korvakkeet sivulla 7.



Kuva 25. Ulkokuoren osakokonaisuuden osat esitettynä yhdessä.

Ulkokuoren osakokonaisuudesta tulee ainakin yhden osan olla kriittinen, koska ilmanvaihtokoneella tulee olla ulkokuori, johon sijoittaa sisäosat. Tämän vuoksi tässä osakokonaisuudessa kriittinen osa on ainakin ulkokuoren pohja, joka on kokoonpanossa ensimmäinen osa, jonka päälle muu kokoonpano kokoonpannaan. Kuitenkaan ulkokuoren ja ulkokuoren pohjan osien yhdistäminen tuottaisi vaikeasti taiteltavan ja suuren leikattavan osan, sekä kasvattaisi liikaa valmistuskustannuksia. Tämän vuoksi ulkokuori ja ulkokuoren pohja luokitellaan kokoonpantavuuden kautta molemmat kriittisiksi osiksi, joihin tullaan kiinnittämään muut osakokonaisuudet. Muut osat osakokonaisuudessa eivät ole kriittisiä ja mahdollisuuksien mukaan tulisi eliminoida.

Ulkokuoren osissa ei esiinny särmäyksissä symmetrisyyttä. Ilmanvaihtokonetta valmistetaan sekä oikea-, että vasen kätsinä. Osien suunnittelussa tulisi pyrkiä aina varmistamaan osien symmetrisuutta, niin että niitä kyetään suoraan käyttämään molemman kätsissä laitteissa. Osia kyetään valmistamaan molempiin kätsyyksiin jo toiseen suuntaan taittamalla, mutta jos se on mahdollista, voidaan symmetrisuudella välttää taittovirheitä ja turhien osien valmistamista. Tämän takia ulkokuoren jauhemaalattavat osat tulisivat olla symmetrisiä, että niitä kyettäisiin valmistamaan aina samalla tavalla, oli kätsisyys mikä tahansa.

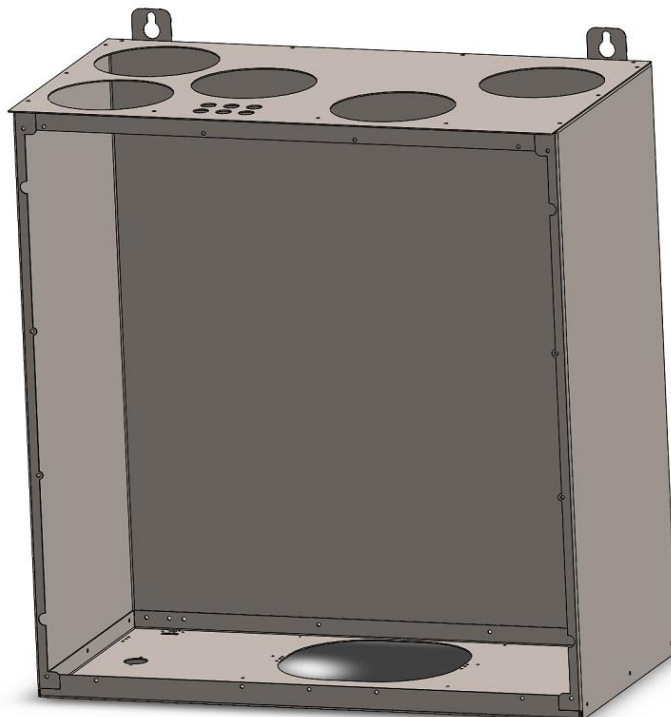
Tällä hetkellä ulkokuoren osan etusärmät ovat epäsymmetrisiä, koska ulkoilmakanavan puoleisella seinämällä tulee olla enemmän eristystä kylmän ilman virtaamisen johdosta. Ulkoilmakanavan puoleisen seinämän paksuus ja eristys kyetään säilyttämään, vaikka ulkokuoren osan etusärmät symmetrisoitaisiin. Ulkokuoren osan tulisi olla valmis käytettäväksi kummassakin kätisyksissä suoraan, jolloin kyetään valmistamaan vain tämän kaltaista osaa. Myös ulkokuoren pohja ja ulkokuoren ovi tulee pyrkiä suunnittelemaan symmetrisiksi. Tällä hetkellä ulkokuoren pohjan epäsymmetrisyys kohteita ovat etusärmä ja kondenssiveden venttiileille suunnattu reikä, joka näkyy kuvassa 25 vasemmalla puolella pohjaa. Oikealla puolella on myös reikä pohjassa, mutta se on sijoitettu enemmän seinämään päin kuin kondenssiveden reikä. Ulkokuoren pohjan symmetroiminen vaatii ulkokuoren etusärmään sijoitettavien vetoniittien reikien symmetroimisen. Tämä vaikuttaa ala kylmäsiltaatkoon, sisäpohjaan ja väliseinä 2 reikiin, jotka yhdistävät nämä osat yhteen. Kuitenkin tämä etusärmän symmetroiminen on toteutettu uudelleen suunnittelussa, niin että näiden osien ominaisuuksien ja geometrioiden sijainteja kokoonpanossa on muutettu. Ulkokuoren ovesa on neljä ruuvia, joiden sijainnit symmetrisoidaan niin, että oven osa käy suoraan molemmin kätisiin laitteisiin. Ovesa on myös kiinnitettynä oven sensorin kieleke, joko tulisi asentaa molemmille puolelle ovea niin, että se voi ottaa kontaktin molemmissa kätisyksissä sensoriin.

Ulkokuoren kiinnittäviä korvakkeita on suunniteltu yhdistettäväksi ulkokuoreen. Korvakkeiden materiaali paksuus on 2 mm mikä on 0,75 mm paksumpaa kuin ulkokuoren ohutlevy. Kuitenkin korvakkeita käytettäessä ilmanvaihtokoneen kiinnitysmenetelmänä voidaan kiinnitys suorittaa myös 1,25 mm paksuilla korvakkeilla ja ilmanvaihtokone tulee kestämään paikoillaan. Tällä yhdistämisellä kyetään eliminoimaan kaksi ohutlevyosaa ja 4 vetoniittiä.

Ulkokuoren katto ei ole kriittinen osa osakokonaisuudessa, mutta se tullaan säilyttämään osakokonaisuudessa kokoonpanon helpottamisen vuoksi. Ulkokuoren katto on viimeinen asennettava osa ohutlevyrungosta ja sen vuoksi sen asentaminen paikoilleen on helpointa, jos ulkokuoren katto on irrallinen osa. Ulkokuoren katosta on poistettu korvakkeiden johdosta tehdyt lovet ja katto on mitoitettu niin, ettei niitä tarvita tiiviuden toteuttamiseksi. Ulkokuoren katon kiinnittäminen ulkokuoreen ja katon kiinnityslistaan toteutuu 17 niitillä. Tätä niittien määrää tulisi pyrkiä vähentämään ja siksi uudessa mallissa on niittejä

vähennetty. Myös uuden liittämismenetelmän hyödyntämistä on mietitty ulkokuoren kattoon esimerkiksi liimauksia ja kaksipuolisia teippejä. Kuitenkin ulkokuoren kattoon voi kohdistua ilmanvaihtokoneen asennuksessa ulkoisia iskuja ja työntäviä voimia, joiden vuoksi niittiliitos on luotettavampi vaihtoehto.

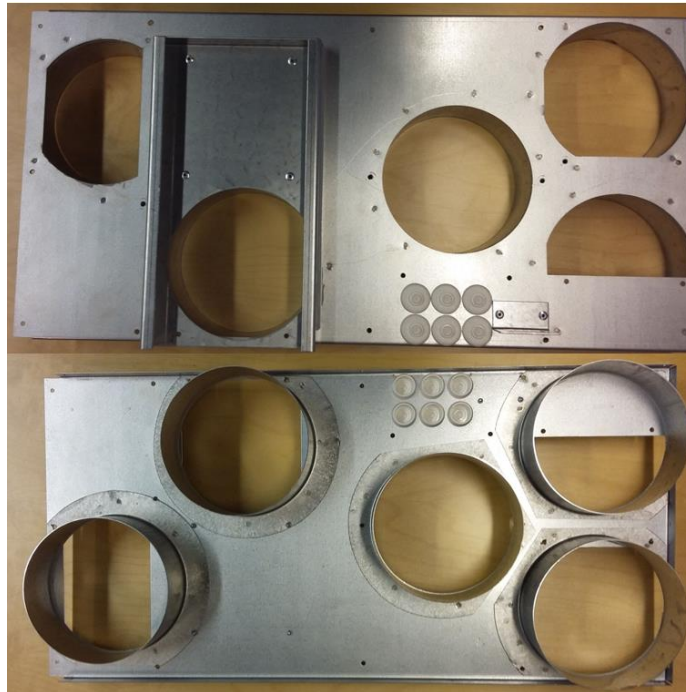
Ulkokuoren katon ja sisäkaton yhdistävät yläpuolen kylmäsiltakatko ja ulkokuoren katon kiinnityslista. Ulkokuoren katon kiinnityslista kiinnittyy ulkokuoren kattoon 4 niitillä ja 5 niitillä kylmäsiltakatkoon, sekä sisäkattoon. Uudelleen suunnittelussa on pyritty niittien määrä vähentämään tässäkin osassa ja kiinnityslista on ajateltu kiinnittyvän 3 niitillä ulkokuoren kattoon ja 4 niitillä kylmäsiltaan, sekä sisäkattoon. Kiinnityslista ei ole kriittinen osa ulkokuoren kokoonpanossa, mutta sen tehtävänä on kiinnittää ulkokuoren katto kylmäsilan kautta sisäosiin niin, etteivät lämpötilat sisäosista välity ulkokuorenkattoon ollenkaan. Tämän vuoksi osa säilytettiin kokoonpanossa. Kuvassa 26 esitetään uudelleen suunniteltu ulkokuoren kokoonpano.



Kuva 26. Ulkokuoren uudelleen suunniteltu osakokonaisuus.

5.2.2 Sisäkaton osakokonaisuus ja sen osat

Sisäkaton osakokonaisuus on uudelleen suunnittelun keskeisimpiä kohtia, joihin yritys haluaa muutoksia. Sisäkaton osakokonaisuuden valmistaminen vie suuren osan kokoonpanon ajasta ja se kootaan kokoonpanossa kuvan 27 mukaisella tavalla. Lähtökauluksen leikkaaminen muotoon, tiivistäminen sisäkattoon, pistehitsaaminen ja niittien reikien poraaminen kauluksiin ovat prosessit, jotka suoritetaan sisäkaton osakokonaisuutta kokoonpantaessa. Uudelleen suunnittelussa pyritään nopeuttamaan tämän osakokonaisuuden valmistamista ja kokoonpanoa.



Kuva 27. Sisäkaton osakokonaisuus kokoonpantuna.

Sisäkaton kokoonpanoon kuuluu vedetyt lähtökaulukset (viisi kappaletta), puhaltimen tukilevy ja sisäkatto. Sisäkaton osakokonaisuuden osien tarkemmat ominaisuuksien esittelyt löytyvät liitteestä II ja sivulta 1. Lähtökaulukset on esitelty liitteen II sivulla 9, puhaltimen tukilevy löytyy sivulta 11 ja sisäkatto löytyy sivulta 10. Sisäkaton osakokonaisuuden osista lähtökaulukset ovat kriittisiä osia osakokoonpanossa. Ilman vastaavanlaisia kauluksia ilmanvaihtokoneeseen olisi mahdoton liittää ilmanvaihtokanavien putkia. Kuitenkin kauluksien toteuttaminen ilmanvaihtokoneessa voisi olla erilainen. Kauluksien yhdistämistä sisäkattoon pohdittiin työn tutkimuksissa. Muovausmenetelmiä, joilla kyettäisiin valmistamaan vastaavan lainen rakenne, joka sisältäisi sisäkaton ja lähtökaulukset, ei

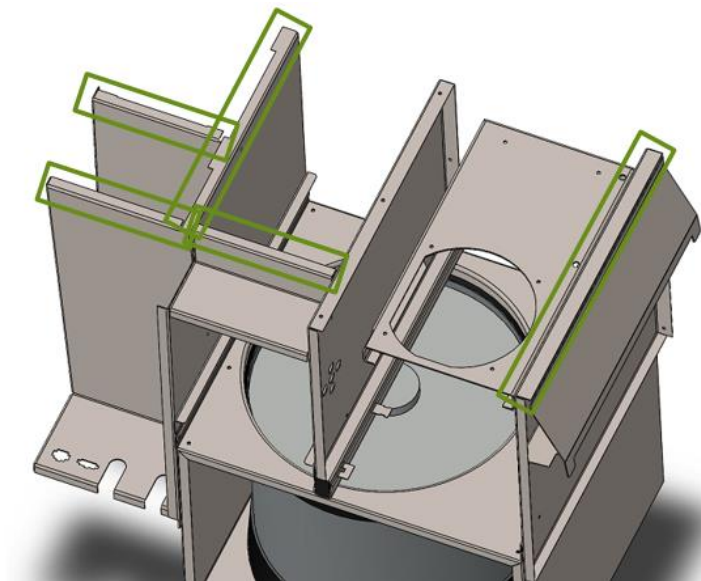
valitettavasti löytynyt. Kauluksien valmistamismateriaali pohdittiin vaihdettavaksi muoviseksi, mutta kauluksiin voi kohdistua ulkoisia iskuja ja voimia, jotka voisivat vahingoittaa muovisia kauluksia. Erillisten kauluksien valmistaminen myös, jollain toisella muovausmenetelmällä kuin syväveto ei onnistu kauluksien korkeuden vuoksi (50mm). Tämän vuoksi kauluksien valmistamismenetelmä syväveto ja erillisenä osana valmistaminen jätettiin samanlaiseksi kuin nykyisessä mallissa.

Lähtökauluksien muotoon leikkaaminen, tiivistäminen ja pistehitsaaminen on todettu yrityksessä aikaa vieväksi prosessiksi. Myöskään pistehitsausliittämistä ei pidetä luotettavana, sillä pistehitsaukset ovat purkautuneet ajoittain yrityksen toiminnassa. Kauluksien muotoon leikkaamista peltisaksilla on ajateltu uudelleen suunnittelussa korvattavaksi hydraulisella prässäys laitteistolla suoritettavaksi kerta lävistykseksi. Kauluksien leikkuut symmetrisoidaan neliön muotoisiksi, jolloin jokainen lähtökaulus on identtinen ja valmistuu samalla tavalla. Myös kauluksien liittämisen on ajateltu uudelleen suunnittelussa tapahtuvan niittauksella, jonka yritys on todennut olevan heille toimiva menetelmä. Tämän vuoksi lähtökauluksiin suunniteltiin 4 niittireikää, jotka voitaisiin myös toteuttaa lävistyksellä prässillä. Tällöin prässäysvaiheita olisi kaksi, jolloin olisi järkevää suorittaa nämä vaiheet kahdella prässäyslaitteistolla. Nämä prosessimuutokset kuitenkin toisivat kokoonpanoon lisää luotettavuutta, sekä pistehitsaus valmistusmenetelmästä ja -vaiheesta päästäisiin yrityksessä eroon. Lähtökauluksien niittien reiät mitoitettiin myös niin, etteivät ne osu sisäkuoren vaippaan tai sisäosakokonaisuuksien väliseiniin.

Kun lähtökauluksien muutokset toteutetaan, tulee myös sisäkaton osakokonaisuuden sisäkatto ja puhaltimentukilevy osaa muuttaa. Sisäkaton vasemman laidan taitto tulisi jättää tasomaiseksi alueeksi, jolloin tämän taiton kiinnitys sisäkuoren vaippaan tapahtuu tasossa. Tämän muutoksen myötä lähtökaulukset saavat enemmän tilaa leikkauksissa ja tällä muutoksella kyetään estämään lähtökauluksien vuodot kauluksien pyöristyksien alta. Puhaltimen tukilevyyn on tehty muutoksia, joilla mahdollistetaan lähtökauluksien niittaaminen sisäkattoon. Puhaltimen tukilevyä ei haluttu, muuten muuttaa, sillä sen avulla toteutetaan puhaltimen vaivaton asennus paikoilleen. Puhaltimen tukilevyn 4 kiinnitys niittireikää suunniteltiin vastaamaan lähtökauluksen niittireikiä, jotta ne voidaan kiinnittää samoilla niiteillä sisäkattoon. Puhaltimen tukilevy kiinnitetään vielä 2 omalla niitillä, joiden reiät pysyvät entisellään, mutta puhaltimen tukilevyyn tehdään kaksi suurempaa reikää,

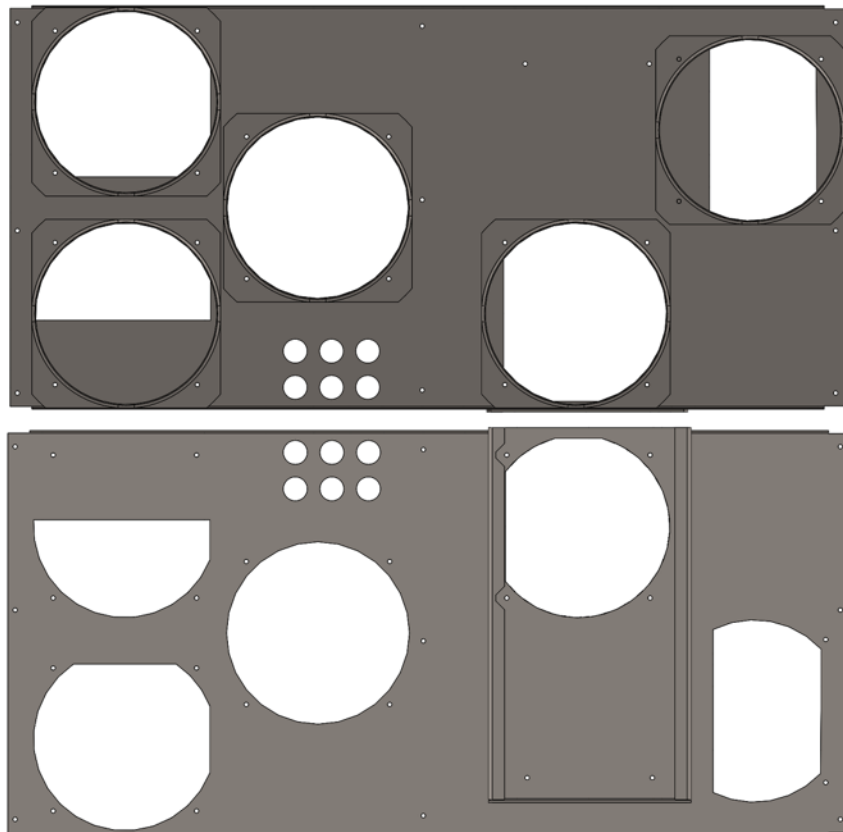
joihin ulkoilmakanavan lähtökauluksen kaksi niittikantaa mahtuvat sijoittumaan. Myös puhaltimen tukilevyn oikean puoleiseen ensimmäiseen taittoon tulee tehdä asennuslovet. Niiden ansiosta niittikiinnitykset kyetään asentamaan vaivattomasti lähtökaulukseen ja puhaltimen tukilevyyn alhaalta päin.

Sisäkattoon tehdään vielä muutoksia niittikiinnityksiin. Sisäkaton etulaidan niittikiinnitykset vähennettäisiin neljästä niittiin viidestä. Myös kiinnitykset väliseiniin 1, 4 ja 5, johtokouruun, sekä sähkölaatikkoon toteutettaisiin kaksipuoleisella teipillä. Tällä vähennettäisiin 11 niitin asentaminen ja korvattaisiin se 5 teipin asennuksella. Kaksipuolisia teippejä, joita voitaisiin käyttää tähän tarkoitukseen, olisivat esimerkiksi 3M:n X-sarjan korkean suorituksen kaksipuolinen teippi XP6114 ja Tesa:n ACXplus 7808 mustanlinjan kaksipuolinen teippi (3M 2017; Tesa 2017.) Nämä teipit ovat pienimmillään 0,8 mm paksuisia ja kykenevät tiivistämään väliseiniä välit, niin ettei tiivistemassaa enää tarvita näihin kohtiin. Kuvassa 28 esitetään vihreillä laatikoilla mihin kohtiin kaksipuoleiset teippiliitokset sijoitetaan. Sisäseinä kiinnittyy sisäosiin 5 teipillä ja 3 niitillä (väliseinä 3 kanssa). Sisäkatto kiinnittyy myös sen tasomaisista päistä ja takasärmästä myös sisäkuoreen 10 niitillä. Näin taataan tarpeeksi luja ja tiivis sisäkaton liittämiseksi sisäkuoren vaippaan ja sisäosiin.



Kuva 28. Väliseiniin, johtokouruun ja sähkölaatikkoon kiinnitettävät teipit sijoitetaan vihreillä laatikoilla merkittyihin kohtiin.

Muokattu sisäkaton osakokonaisuus voidaan nähdä kuvasta 29. Kuvasta nähdään osakokonaisuus ylä ja ala puolelta, jolloin nähdään lähtökauluksien symmetroimisen vaikutus, sekä lähtökauluksien niittikiinnityksien vaatimat muutokset sisäkattoon ja puhaltimen tukilevyyn. Kuvassa 29 nähdään myös puhaltimen tukilevyyn tulevat kokoonpanoa helpottavat lovet ja niittien uudelleen sijoittaminen vastaamaan lähtökauluksia.

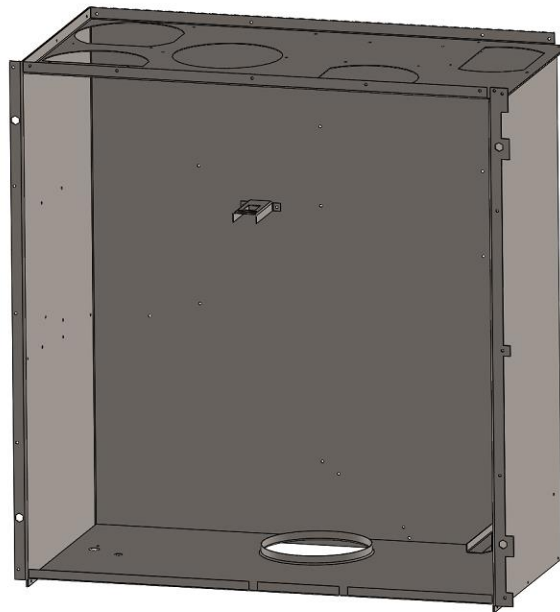


Kuva 29. Sisäkaton osakokonaisuuden uudelleen suunniteltu kokoonpano.

5.2.3 Sisäkuoren osakokonaisuus ja sen osat

Sisäkuoren osakokonaisuuteen kuuluvat sisäkuoren vaippa, sisäkuoren pohja ja sisäkatto. Osakokonaisuuteen on myös mallinnettu anturin pidikelevy ja suodatinkisko alempi, koska ne ovat erillisiä osia, jotka kokoonpannaan yksinään. Tämän osakokonaisuuden osakohtaiset kuvat ja ominaisuudet löytyvät liitteestä II ja sivulta 12 löytyy sisäkuoren vaippa, sivulta 13 löytyy sisäkuoren pohja, sivulta 10 löytyy sisäkatto, sivulta 14 löytyy anturin pidikelevy, sekä sivulta 15 löytyy suuremman suodattimen alempi tukilevy. Sisäkuoren osakokonaisuudesta kriittinen osa on sisäkuoren vaippa. Sisäkuoren vaippa on

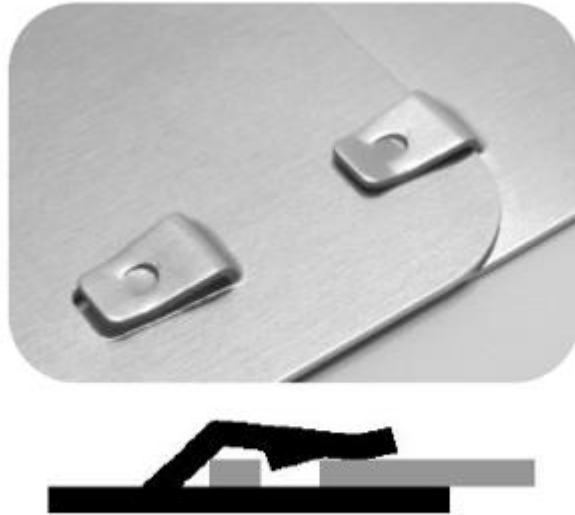
ilmanvaihtokoneen rakenteelle kriittinen, koska sisäkuoren vaippa on se osa, johon tullaan kiinnittämään kaikki sisäosakokonaisuudet. Kuvassa 30 nähdään koottu sisäkuoren osakokonaisuus.



Kuva 30. Sisäkuoren osakokonaisuus nykyisessä kokoonpanossa.

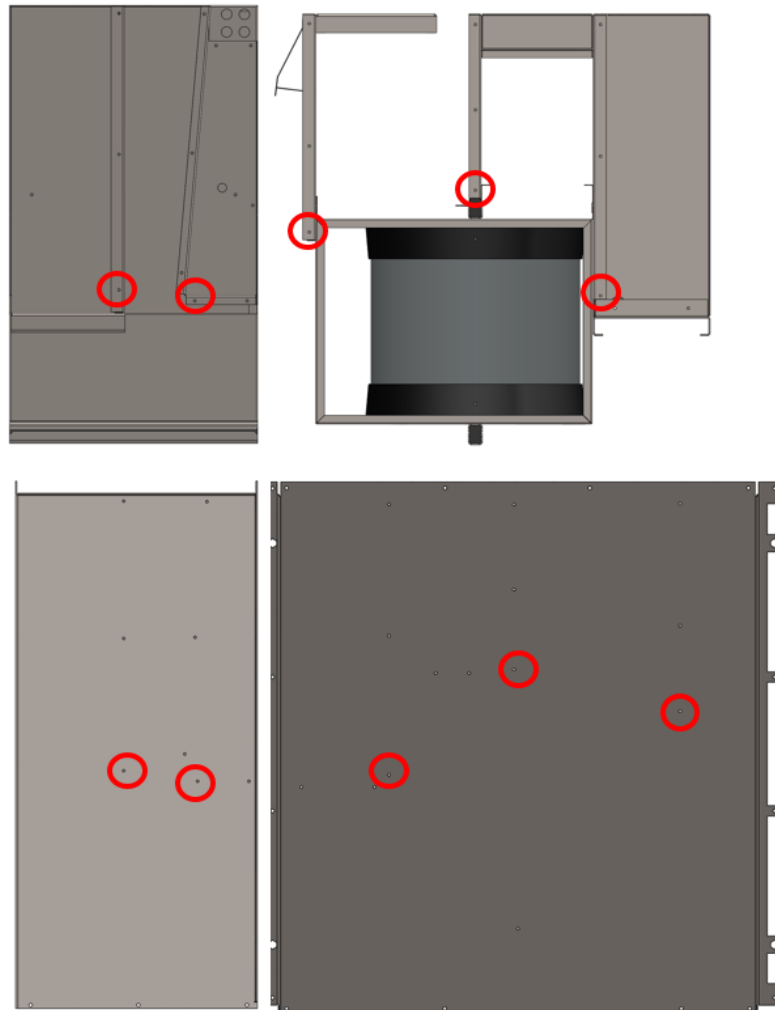
Sisäkattoon tehtyjen muutoksien, johdosta tulee sisäkuoren vaippaa muuttaa. Sisäkuoren vaipan taittamaton vasen laita tulee taittaa samalla tapaa kuin oikea ylä laita, jotta sisäkatoista saadaan tasomainen. Sisäkuoren vaippaan tehdään siis uusi taitto vasempaan ylä laitaan, jolla mahdollistetaan sisäkaton osakokonaisuuden muutokset. Sisäkuoren vaipan etummaisiin särmäyksiin tulee myös muutoksia. Etusärmissä sijaitsevat oven ruuvin reiät sijoitetaan uudelleen ja kylmäsiltakatkojen niittien reikiä vähennetään. Sisäkuoreen kiinnitettävien osakokonaisuuksien kiinnittämistä on myös pyritty uudistamaan. Pelkillä niiteillä suoritettavaa kiinnitystä pyritään parantamaan SnapLock™-kiinnikkeiden sijoittamisella osakokonaisuuksien alareunoihin. SnapLock™-kiinnityksellä helpotettaisiin kokoonpanon vaihetta, jossa osat voidaan sijoittaa paikoilleen SnapLock™-kiinnikkeisiin, joissa ne pysyisivät kiinni, kun kokoonpanija kiinnittää osat lopullisesti sisäkuoren ulkopuolelta niiteillä. SnapLock™-kiinnittimet helpottaisivat näin kokoonpanoa, niin ettei osia tarvitse enää pidellä paikoillaan niittauksen aikana. SnapLock™: ien käyttämisessä vähennettäisiin myös kiinnikkeiden eli tässä tapauksessa niittien määrää. Kuvassa 31 nähdään, SnapLock™

muovattu kiinnike osa, joka muistuttaa kielekettä, missä on puristusta, sekä kieleke kiinnitys levyn kanssa.



Kuva 31. SnapLock™-kiinnitin (Mate precision tooling 2017.)

SnapLock™ kiinnike vuotaa ilmaa läpi vaakasuunnassa, kuten kuvassa 31 alemmasta kuvasta voidaan nähdä. Tämän ilmavuodon estämiseksi tulee jättää SnapLock™-kiinnittimen ja levynreunan väliin tilaan, niin että väliseinät kytetään tiivistämään tarpeeksi hyvin. Sisäkuoren tulee myös olla tiivis, niin ettei se vuoda ilmaa ilmakanavista sisäseinän sisään. SnapLock™-kiinnikkeet laskevat ilman vuotamaan sisäkuoren läpi. Tämä vuoto voidaan ehkäistä eristys solumuovin liimapinnoilla tai tiiveys voidaan varmistaa alumiiniteipeillä SnapLock™-kiinnikkeiden kohdissa. Kuvassa 32 nähdään, punaisin ympyröin merkityt alueet, joihin SnapLock™-kiinnitystä voitaisiin soveltaa. SnapLock™:in muovatut kielekkeet tulevat sisäkuoren vaippaan ja vasta levyn kohtiin, jotka esitetään kuvassa 32, tulee ainoastaan sijoittaa reikä, mihin SnapLock™:in kielekkeen ympyrän muotoinen uurre sijoittuu lukitsevasti. Valmistuskuviin SnapLock kiinnike tulee mallintaa, niin että pyöreä uurteen ja sen vastakkaisen levyn reiän kohdat tulee merkitä selkeästi valmistus piirustuksiin. SnapLock™ valmistetaan levyihin yhdellä työkalun lävistyksellä ja työkalun iskun sijainti tulee tällöin olla kohdistettuna uurteen ja ympyrä reiän keskiöön.

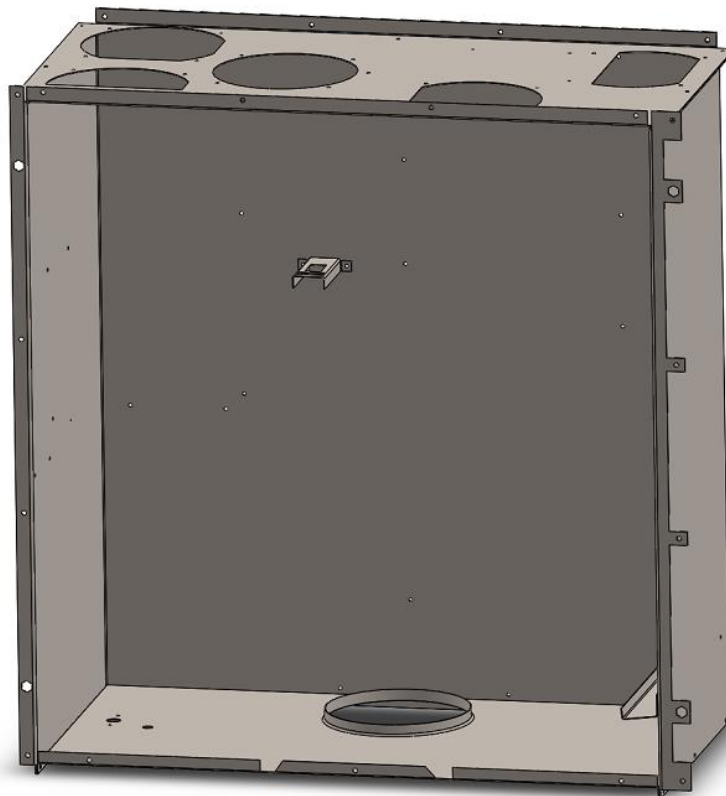


Kuva 32. SnapLock™-kiinnittimen sijoitus kohdat punaisilla ympyröillä esitettynä väliseiniin ja sisäkuoren vaippaan.

Sisäkuoren vaipan etusärmään, tehdään muutos, joka johtuu väliseinä 2 (liite II, sivu 12) geometrian muutoksista. Välisenä 2 muutetaan, jotta ulkokuoren pohja kyetään symmetrisoimaan uudelleen suunnittelussa. Sisäkuoren pohjan etusärmään tehdään leikkuut joilla väliseinä 2 mahtuu tulemaan etusärmän leikkuiden kohdalle. Sisäkuoren pohjassa on myös muovattu kaulus, jolla estetään kondenssiveden pääsy liesituulettimen aukosta. Muovaus suoritetaan syvävetämällä ja tätä valmistusmenetelmää tulisi harkita vaihdettavaksi. Uudelleen suunnitteluissa ei vielä tehty muutoksia sisäkuoren pohjan valmistukseen, mutta syvävedon menetelmän vaihtaminen levytyökeskuksella tehtäväksi muovaamiseksi tulisi harkita. Kauluksen muodosta joudutaan luopumaan levytyökeskuksella, mutta muovauksen voisi suorittaa leikkuuprosessin yhteydessä.

Sisäkuoren pohjan kiinnittäminen ulkokuoreen ja ala kylmäsilta-putkikoon tapahtui ennen 5 niitillä ja uudelleen suunnittelussa se tehtäisiin 3 niitillä.

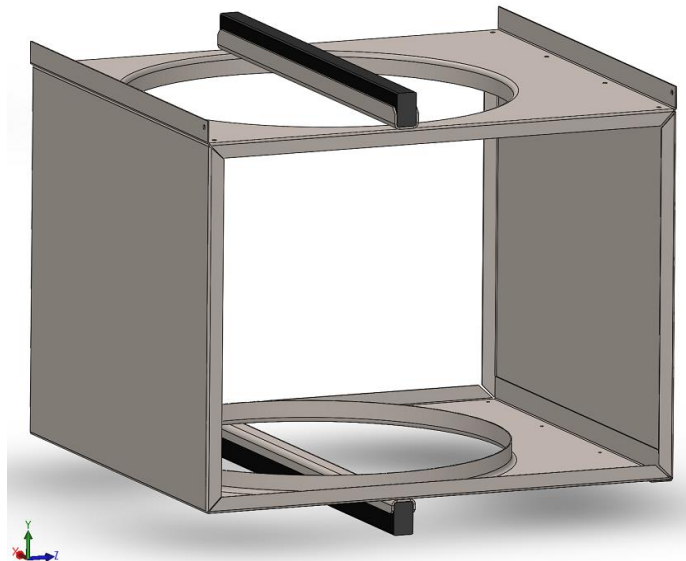
Sisäkuoren osakokonaisuuteen yhdistetty alempi suodatinkisko (liite II sivu 15) on myös muuttunut uudelleen suunnittelussa. Nykyisessä mallissa suodatinkisko valmistetaan suorittamalla kolme taittoa, joiden tarkoituksena on ollut luoda suodatimelle oikean kulmainen alustus mihin tiivistystä. Tämä kuitenkin voidaan toteuttaa osalla missä taitetaan vain kaksi kertaa. Muuttuneessa osassa keskimäinen taitto on korvattu oikeaan kulmaan taivutetulla yhdellä taitolla. Sisäkuoren osakokonaisuuteen yhdistettyyn anturin kiinnikelevyyn ei ole tehty muutoksia, koska anturin ohutlevy alihankitaan anturin yhteydessä. Tämän vuoksi se on jätetty entiselleen. Kuvassa 33 nähdään sisäkuoren osakokonaisuuden uudelleen suunniteltu malli.



Kuva 33. Uudelleen suunniteltu sisäkuorien osakokonaisuus.

5.2.4 Lämmönvaihtimen ympäröivä osakokonaisuus

Pyörivän lämmönvaihtimen osakokonaisuus on osakokonaisuus, joka kokoonpannaan ja asennetaan paikoilleen eri pisteellä, kuin muut osakokonaisuudet. Tämä osakokonaisuus kokoonpannaan pyörivän lämmönvaihtimen ja sen kennomoottorin ympärille. Osakokonaisuuteen liitetään osakokonaisuuden kokoonpano vaiheessa kriittisiä toiminnallisia kokonaisuuksia, jonka jälkeen valmis kokoonpantu osakokonaisuus liu'utetaan sen paikoilleen muuhun valmiiksi kokoonpantuun ohutlevyrunkoon. Tämän osakokonaisuuden käsiteltävät osa tässä työssä ovat roottorin sivupelti 1, roottorin sivupelti 2, roottorin sivupelti 3, roottorin c-kisko ja kennon alalista. Liitteessä II esitellään osat roottorin sivupelti 1 sivulla 25, roottorin sivupelti 2 sivulla 26, roottorin sivupelti 3 sivulla 27, roottorin c-kisko sivulla 34 ja kennon alalista sivulla 35. Kuvassa 34 esitetään nykyinen pyörivän lämmönvaihtimen ympäröivä osakokonaisuus.

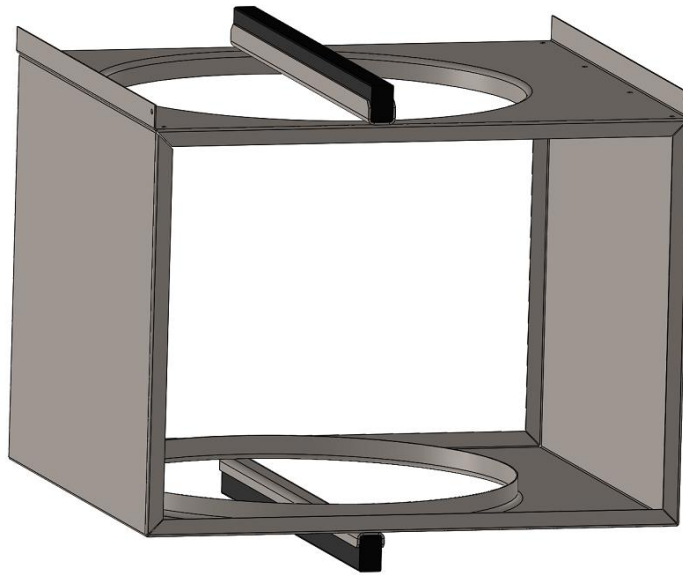


Kuva 34. Pyörivän lämmönvaihtimen ympäröivä osakokonaisuus.

Pyörivän lämmönvaihtimen osakokonaisuudessa ilmenee yksi kriittinen osa. Toiminnaltaan yksi kriittinen osa on olemassa, koska osakokonaisuus halutaan pitää erillisenä asennettavana ja irrotettavana yksikkönä. Lämmönvaihtimen ja kennomoottorin tulee siis tukeutua ja olla asennettavissa yhteen roottorin sivupelleistä, jotka kyettäisiin valmistamaan yhdestä osasta. Tässä työssä kriittiseksi osaksi on määritelty roottorin sivupelti 3, jonka päälle asennetaan lämmönvaihdin ja kennomoottori.

Osakokonaisuuden roottorin sivupelti 1 kiinnitetään roottorin sivupelti 2 ja 3 neljällä ruuvilla kumpaankin osaan. Tämä johtuu siitä, että roottorin sivupelti 1 tulee olla irrotettavissa, jotta lämmönvaihtimeen ja sen kennomoottorin päästään huollettaessa käsiksi. Tämä ominaisuus halutaan säilyttää, joten sitä ei muutettu uudelleen suunnittelussa. Koko osakokonaisuus kiinnitetään muuhun ohutlevyrunkoon, niin että roottorin sivupelti 1 ylöspäin taitetut särmät liu'utetaan kennon liu'un listoihin ja ruuvataan yhdellä ruuvilla molemmilta puolilta. Koko osakokonaisuus tukeutuu sisäkuoren vaipan takaseinään ja takaseinän, sekä roottorin sivupeltien väliin sijoitetaan eristemateriaalia. Pyörivä lämmönvaihdin aiheuttaa toimiessaan tärinää, jota pyritään vähentämään tärinävaimentimilla ja mustilla solumuovin osilla, jotka sijoitetaan roottorin c-kiskoon, sekä kennon alalistaan, kuvan 33 mukaisesti. Nämä solumuovit tukeutuvat yläpuolella väliseinä 3 ja alapuolella toiseen vastakkaiseen c-kiskoon, joka on väliseinä 2 päällä. Alapuolella oleva solumuovi ottaa vastaan tämän osakokonaisuudesta jäljelle jäävästä painosta. Koko osakokonaisuuden kiinnittäminen ja vaimentaminen halutaan pitää samanlaisena, koska sen on todettu olevan helppo ja toimiva tapa. Näiden asioiden, johdosta roottorin sivupelti 1 osaa ei ole muutettu ollenkaan uudelleen suunnittelussa. Myös c-kisko ja kennon alalista pysyvät entisellään geometrioiltaan.

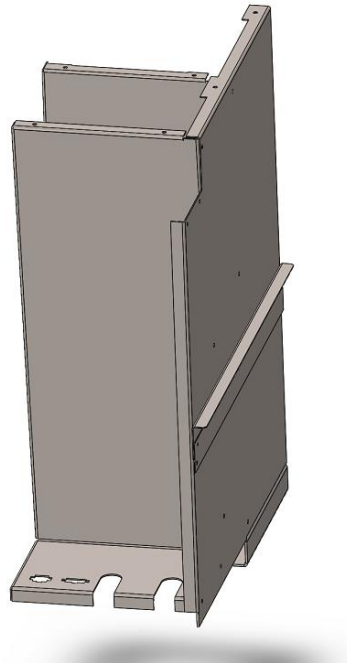
Roottorin sivupelti 2 osa on kiinnitetty 4 niitillä roottorin sivupelti 3. Roottorin sivupelti 2 ei ole kriittinen osa, eikä sitä tarvitse huollon yhteydessä irrottaa. Roottorin sivupelti 2 on irrallinen osa, koska aikaisemmin ilmanvaihtokoneen automatiikkaa asennettiin tämän osakokonaisuuden yhteyteen ja tällainen irrallisen osan ratkaisu helpotti kokoonpanoa huomattavasti. Kuitenkin nykyisessä mallissa ilmanvaihtokoneen automatiikkaa on siirretty sähkölaatikkoon ja nyt irrallisella roottorin sivupelti 2 osalla ei ole virkaa osakokonaisuudessa. Tämän vuoksi roottorin sivupelti 2 ja 3 on yhdistetty yhdeksi osaksi, jolloin eliminoidaan myös 4 niittiä. Uudistettu pyörivän lämmönvaihtimen ympäröivä osakokonaisuus nähdään kuvassa 35.



Kuva 35. Uudelleen suunniteltu lämmönvaihtimen ympäröivä osakokonaisuus.

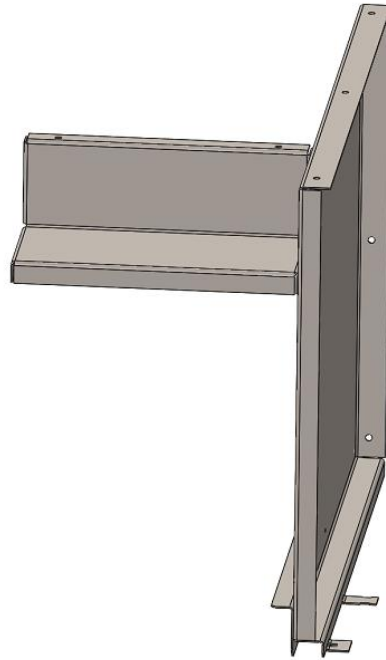
5.2.5 Sisäosakokonaisuus 1 & 2

Sisäosakokonaisuus 1 on osakokonaisuus, joka sijaitsee liesituulettimen ja jäteilmakanavan alapuolella. Osakokonaisuuden osat on eritelty liitteessä II ja näitä osia ovat sähkölaatikko (liitteen sivu 16), väliseinä 5 (liitteen sivu 17), väliseinä 4 (liitteen sivu 18), poistoilmapuhaltimen tukilevy (liitteen sivu 19), kennon liu'un listat sisäosa 2 (liitteen sivu 20) ja kennon liu'un listat ulko-osa (liitteen sivu 21). Sisäosakokonaisuus 1 kokoonpannaan kuvan 36 mukaiseen kokoonpanoon, joka tämän jälkeen kiinnitetään sisäkuoren vaippaan niiteillä sisäkuoren vaipan ulkopuolelta.



Kuva 36. Sisäosakokonaisuus 1 nykyisen mallin mukaan.

Sisäosakokonaisuus 2 on osakokonaisuus, joka sijaitsee poistoilmakanavan alapuolella ja keskellä ilmanvaihtokonetta. Osakokonaisuuden osat on eritelty liitteessä II ja näitä osia ovat johtokouru (liitteen sivu 23), väliseinä 3 (liitteen sivu 22) ja väliseinä 3 sivulista (liitteen sivu 31). Sisäosakokonaisuus 2 kokoonpannaan, niin että johtokouru liitetään sisäosakokonaisuus 1 erillisenä osana ensin. Tämän jälkeen loput sisäosakokonaisuus 2, jotka on kokoonpantu jo valmiiksi yhteen, liitetään johtokouruun ja sitten sisäkuoren vaippaan sen ulkopuolelta. Kuvassa 37 esitetään sisäosakokoonpano 2 osat yhdessä nykyisen mallin mukaisena.



Kuva 37. Sisäosakokonaisuus 2 nykyisen mallin mukaan.

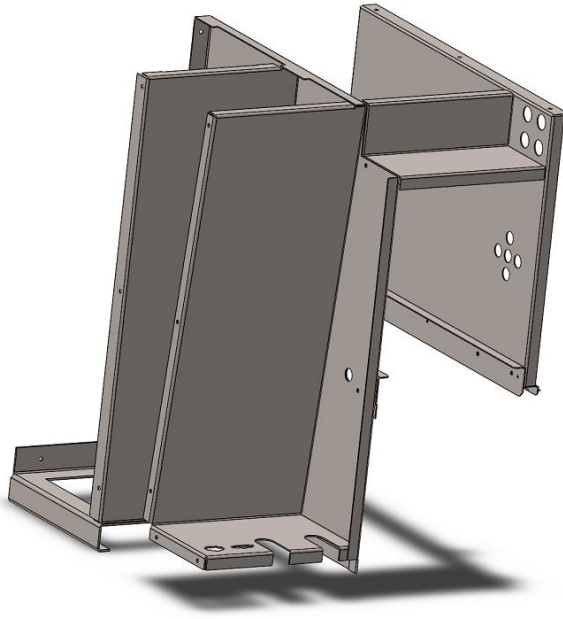
Uudelleen suunnittelussa sisäosakokonaisuuden 1 ja 2 kokoonpanoa helpottamiseksi ne on yhdistetty yhdeksi suureksi sisäosakokonaisuudeksi, jonka kokoonpano sisäkuoren vaippaan voidaan suorittaa samanaikaisesti yhdessä, sekä myös sisäosakokonaisuus 3 ja 4 kanssa. Tämä mahdollistetaan, kun sisäosakokonaisuuksien kiinnitysmenetelmiin lisätään SnapLock™-kiinnittimet mitkä pitävät näitä sisäosakokonaisuuksia paikoillaan, kun kokoonpanija liikuttaa kappaletta, niin että pääsee sisäkuoren vaipan ulkopuolelle missä niittaa osakokonaisuudet lopullisesti kiinni. SnapLock™-kiinnikkeitä lisättäisiin yhdistettyyn sisäosakokonaisuuden osista sähkölaatikkoon, väliseinä 5, väliseinä 4 ja väliseinä 3 niin kuin aiemmassa kappaleessa esitettiin. Näin vähennetään myös niittien tarvetta.

Yhdistetyn sisäosakokonaisuuden liittäminen sisäkaton kanssa myös uudistuu. Uudelleen suunnitellussa mallissa sähkölaatikon, väliseinä 5, väliseinä 4 ja johtokourun liittäminen sisäkaton kanssa suoritetaan kaksipuoleisilla teipeillä. Teipillä voidaan luoda luotettavan tiivis liittäminen sisäosien ja katon välille. Väliseinä 3 liitetään vielä sisäkaton kanssa niiteillä, jotta varmistetaan luja liitos sisäkaton ja sisäosien välille. Teippi liitoksilla vähennetään niittien tarvetta 8 niitillä (johtokourusta 2, väliseinä 4:sta 2, väliseinä 5:sta 2 ja sähkölaatikosta 2).

Sisäosakokonaisuuden osat kennonliu'un listat sisäosa 2 ja ulko-osa yhdistetään uudelleen suunnittelussa yhdeksi osaksi. Tämä yhdistäminen mahdollistetaan esimerkiksi Wilson wheel offset työkalulla. Työkalulla luodaan levynpaksuinen muovaus, jolla mahdollistetaan roottorin sivupelti 1: sen liukuminen paikoilleen samaan tyyliin kuin ennenkin. Liitteen II sivulla 21 esitetään työkalulla luotava muoto vielä tarkemmin. Yhdistämisellä yksinkertaistetaan osakokonaisuutta, sekä eliminoidaan yhden erillisen osan valmistus.

Sisäosakokonaisuudessa muokataan myös väliseinä 4 ja poistoilmapuhaltimen tukilevyn muotoja. Nykyisessä mallissa poistoilmapuhaltimen tukilevy kiinnittyy neljällä niitillä väliseinä 4 suureen taittoon (mahdollista nähdä liitteen II sivulla 18), johon kiinnittyy myös väliseinä 5. Uudelleen suunnittelussa on pyritty poistamaan tämä suuri taitto osio väliseinä 4 osasta, niin että poistoilmapuhaltimeen on suunniteltu yksi uusi taitto sen osan taakse, jolla se kiinnittyy kahdella niitillä suoraan sisäkuoren vaippaan. Poistoilmapuhallin kiinnittyy myös suoraan väliseinä 5 niin kuin aiemmassakin mallissa, mutta nyt väliseinä 4 osan suuri taitto ei ole niiden välissä. Tällä toimenpiteellä poistetaan 3 niitin tarve, jotka olivat kiinnittymässä väliseinä 4 suuresta taitosta sisäkuoren vaippaan. Väliseinä 3 on ilmanvaihtokoneen toiminnallisuuden kannalta kriittinen osakokonaisuuden osa, koska sen pieniin taittoihin liitetään lämpötilaa mittaavia antureita ja se tukee värinää ehkäisevää solumuovia.

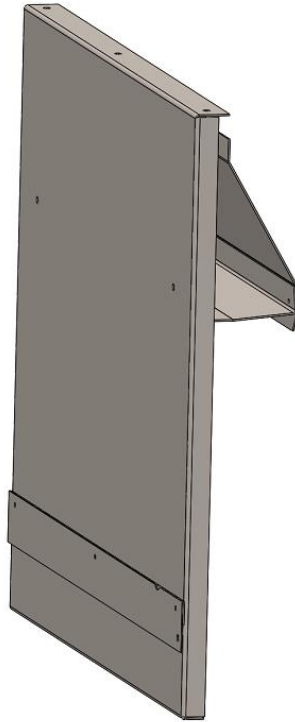
Kuvassa 38 esitetään uudelleen suunniteltu ja yhdistetty sisäosakokonaisuus 1 ja 2. Uudelleen suunnittelussa mallissa sisäosakokonaisuudet 1 ja 2 kokoonpannaan kuvan 37 mukaiseen kokonaisuuteen, ennen osien liittämistä sisäkuoren vaippaan. Sisäosakokonaisuuksien kokoonpano suoritetaan ensin ja sen jälkeen yhdistetty sisäosakokonaisuus asetetaan paikoilleen sisäkuoren vaippaan SnapLock™ kiinnittimien avulla. Osakokonaisuus pysyy paikoillaan 4 SnapLock™-kiinnittimien avulla ja kokoonpanijan on näin helpompi suorittaa loppujen niittien asennus sisäkuoren vaipan ulkopuolelta samanaikaisesti.



Kuva 38. Uudelleen suunniteltu yhdistetty sisäosakokonaisuus 1 ja 2.

5.2.6 Sisäosakokonaisuus 3

Sisäosakokonaisuus 3 on osakokonaisuus, joka sijaitsee ulkoilmakanavan alapuolella. Osakokonaisuuden osat on eritelty liitteessä II ja näitä osia ovat suodatinkisko ylempi 1 (liitteen sivu 28), suodatinkisko ylempi 2 (liitteen sivu 29), kennon liu'un listat sisäosa 1 (liitteen sivu 33), kennon liu'un listat ulko-osa (liitteen sivu 21) ja väliseinä 1 (liitteen sivu 24). Sisäosakokonaisuudessa ei varsinaisesti ole yhtään kriittistä osaa, sillä se kyettäisiin integroimaan muihin osakokonaisuuksiin. Kuitenkin osakokonaisuus on hyvä pitää erillisenä osakokonaisuutena ilmanvaihtokoneen nykyisen toiminta periaatteen vuoksi. Kuvassa 39 esitetään sisäosakokonaisuus nykyisessä kokoonpanossaan.

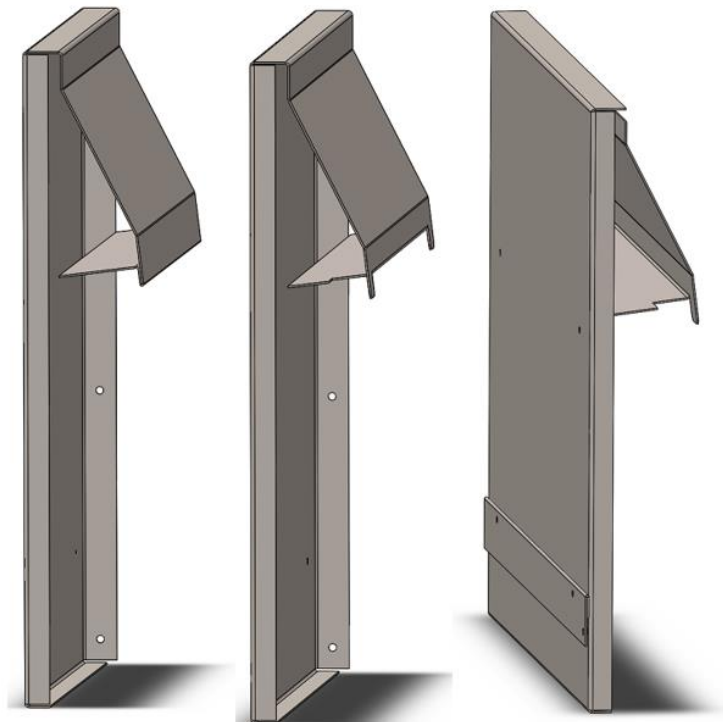


Kuva 39. Sisäosakokonaisuus 3 nykyisen mallin mukaan.

Kennon liu'un listat sisäosa 1 ja ulko-osa yhdistetään uudelleen suunnittelussa niin, että näiden osien korvaava yksi osa valmistetaan litistys taitolla yhdestä levystä. Litistys taivutus voidaan suorittaa särmäyspuristimen työkaluilla. Silloin tulee huomioida, kun litistykseen molemmille puolille tahdotaan niittikiinnityksen reiät, voi samankokoisten reikien sijainnit heittää toisistaan. Silloin tulee suunnitella litistykseen takapuolelle suuremmat reiät, jotka mahdollistavat sen, ettei pieni reikien heitto toisistaan haittaa. Kuitenkin Mate precision tooling yritys tarjoaa nykyisin litistys työkalua, jolla kyetään suorittamaan ensin litistys ja sen jälkeen reikien lävistys. Molemmat menetelmät ovat osien yhdistämisen mahdollistavia menetelmiä. Yhdistetystä osasta on myös poistettu yksi niitin tarve (ennen 3 niitin kiinnitys väliseinä 1:seen, nyt 2 niitin kiinnitys), koska osaan ei kohdistu suuria jännityksiä tai voimia ilmanvaihtokoneen ollessa päällä.

Myös ylemmän suodatinkiskon osat 1 ja 2 on yhdistetty uudelleen suunnittelussa yhdeksi osaksi. Uudelleen suunnittelun kehitysvaiheessa esitettiin useita erilaisia mahdollisia osien yhdistelyjä, joilla voitaisiin toteuttaa suodatimen tukeminen. Myös suodatinkiskojen yhdistämistä väliseinä 1:seen mietittiin. Tämän lainen toteutus onnistuisi, jos väliseinä 1:

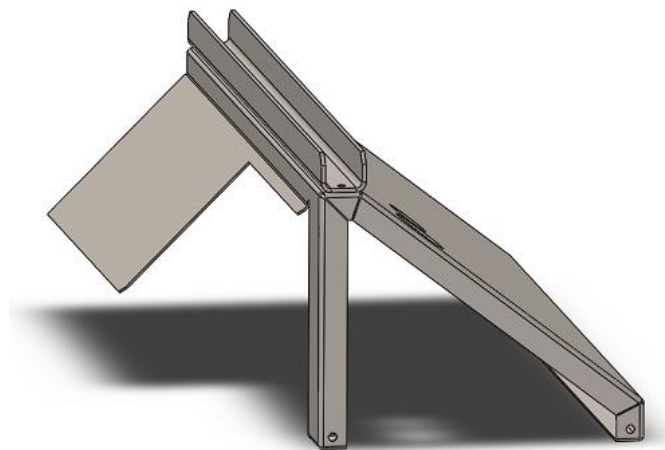
sen ylimmän taiton ja suodatinkiskon yhdistävään taittoon leikataan helpotukset, joiden avulla suodatinkisko kyetään jälkitaivuttamaan asemaansa käsin. Myös suodattimen tiivistystä on mietitty erilaisten vaihtoehtojen kanssa. Leikattu hampaallinen versio on huonompi tiivistyksen kannalta, sillä hammastuksien jättämät reiät tiivistystasossa voivat aiheuttaa nykyisen tiivistysmenetelmän vuotoja. Kuitenkin tämäkin vuoto voidaan estää tiivistysnauhan kääntämisellä. Kuvassa 40 esitetään erilaisia toteutusmahdollisuuksia sisäosakokonaisuus 3 luomiseksi. Vasemman reunimmaisessa versiossa toteutetaan suodattimen tuenta litistystaitettuun särmään. Tässä mallissa tiivistys on takuuvarmaa, mutta taittamisprosessi on haastavampaa. Molemmissa, sekä keskimmaisessä ja oikean puoleisessa versiossa käytetään hammastukseen tuentaa, jossa tiivistysnauha tulee jopa siirtää suodattimessa toiselle puolelle, että tiivistys suodattimessa on taattu. Nämä hammastuennalliset versiot on kuitenkin helpompi taivuttaa. Myös jälkitaivutettavat versiot ovat siitä riski valintoja, koska jälkitaivuttaminen oikeaan asentoon vaatii harjoittelua, sekä osaamista.



Kuva 40. Uudelleen suunniteltu sisäosakokonaisuuden 3 kolme eri vaihtoehtoista toteutusmallia.

5.2.7 Sisäosakokonaisuus 4

Sisäosakokonaisuus 4 on osakokonaisuus, joka sijaitsee pyörivän lämmönvaihtimen alapuolella. Osakokonaisuuden osat on eritelty liitteessä II ja näitä osia ovat c-kisko (liitteen sivu 34) ja väliseinä 2 (liitteen sivu 30). Sisäosakokonaisuudessa väliseinä 2 on toiminnollisuudeltaan kriittinen osa kokoonpanossa. Väliseinä 2 suorittaa pyörivän lämmönvaihtimen ympäröivän osakokonaisuuden painon tuennan, mitä jää jäljelle sisäkuoren vaipan ja kahden ruuvikiinnikkeen jälkeen tuettavaksi. Väliseinä 2 toimii myös lämmönvaihtimen toiminnallisen keskilinjän jakajana. Sen tulee olla tarpeeksi tiivis, että kyetään jakamaan ulkoilmakanavan tila, jäteilmän ja liesikuvun ilman tilasta. Väliseinä 2 toimii myös ilmanvaihtokanavan toiminnassa syntyvän kondenssiveden jakajana, niin ettei kondenssivesi pääse valumaan sisäpohjan kauluksen sisälle ja sieltä liesikupuun. C-kisko ei ole kriittinen osa, mutta sen avulla pidetään paikoillaan tärinän vaimentavaa ja tuennassa avustavaa solumuovia. Kuvassa 40 nähdään nykyisen mallin mukainen sisäosakokoonpano 4 ja sen osat.

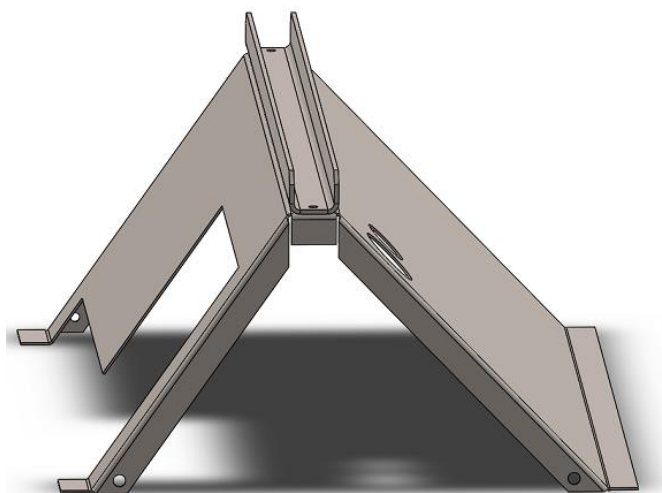


Kuva 41. Sisäosakokonaisuus 4 nykyisen mallin mukaan.

Väliseinä 2 osaa ei valitettavasti kyetty valmistamaan symmetrisesti, sillä ulkokuoren pohjan symmetroiminen menee väliseinä 2 symmetroimisen edelle. Ulkokuoren pohja kiinnittyy kahdella niitillä väliseinä 2:seen ja näiden niittien reiät tulee olla yhtä kaukana ulkoreunan etusärmän keskikohdasta, jotta varmistetaan ulkokuoren symmetrisyys. C-kisko on sijoitettu tukemaan pyörivää lämmönvaihtimen ympäröivää osakokonaisuutta, niin että se tulee ympyrämuotoisen lämmönvaihtimen keskikohtaan. Tämä keskikohta on erillään ulkokuoren pohjan keskikohdasta ja näin syntyy eroavaisuus väliseinä 2 mitoittamisessa. Väliseinä 2:sta

ei voida myöskään täysin symmetrisoida, koska toiselle puolelle kaltevia seinämiä tulee tehdä liesikuvun ilman läpi laskeva ilmankulkuaukko ja toiselle puolelle johtojen mentävät reiät.

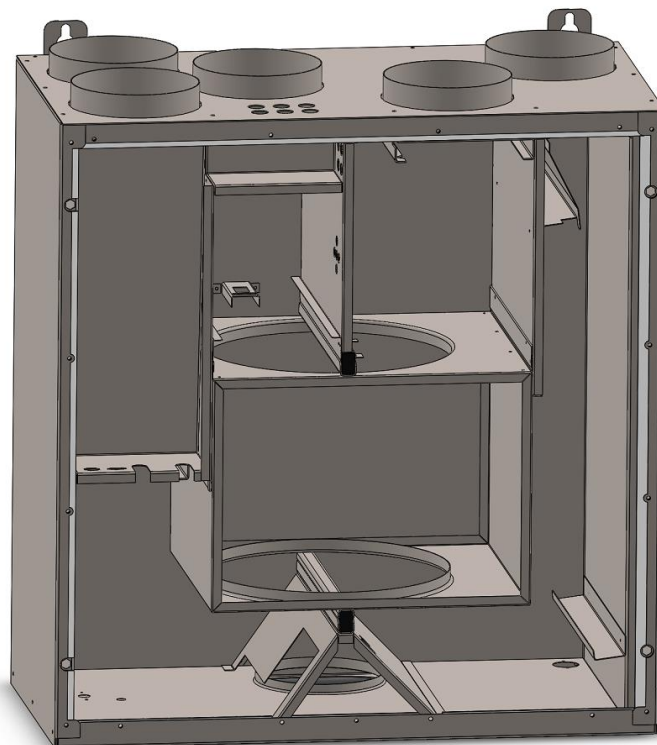
Uudelleen suunnittelussa väliseinä 2 on pyritty yksinkertaistamaan. Nykyisessä mallissa väliseinä 2 geometriat ovat monimutkaisia. Uudelleen suunnittelussa mallissa on pyritty vähentämään suoritettavia taittoja ja kiinnityksiä. Uudelleen suunnittelussa väliseinä 2 suoritetaan 10 taittoa, kun entisessä mallissa suoritettiin 12 taittoa. Uudelleen suunnittelussa mallissa väliseinä 2: sen kiinnittäminen sisäkuoren vaippaan toteutetaan 3 niitillä, kun entisessä mallissa se toteutettiin 4 niitillä. C-kiskon ja väliseinä 2: sen kiinnittäminen toisiinsa toteutettiin 2 niitillä ja osien väliin tuli laittaa tiivistemassa, että varmistettiin osien välinen tiiveys. Uudelleen suunnittelussa osakokonaisuudessa kiinnitys suoritetaan yhdellä kaksipuoleisella teipillä. Sillä kyetään kiinnittämään osat toisiinsa tarpeeksi lujasti ja kyetään suorittamaan tiivistäminen osien välillä. Kuvassa 42 nähdään uudelleen suunniteltu sisäosakokonaisuus 4. Kuvasta näkyy, että c-kisko osa on identtinen osa toiseen c-kiskoon mikä tullaan jatkossakin kiinnittämään kahdella niitillä roottorin sivupelti 1. Tämän vuoksi myös tämän osakokonaisuuden c-kiskossa on 2 niitin reiät, muttei niitä tulla käyttämään tässä osakokonaisuudessa.



Kuva 42. Uudelleen suunniteltu sisäosakokonaisuus 4.

6 UUELLEEN SUUNNITTELUN TULOKSET

Ilmanvaihtokoneen uudelleen suunnittelussa toteutettiin DFMA:n mukaisesti osien ja osakokonaisuuksien yksinkertaistamista, osien ja kiinnikkeiden vähentämistä, kokoonpanemisen helpottamista, symmetrisointia, sekä valmistusmenetelmien vaihtamista tehokkaimpiin vaihtoehtoihin. Työn edellisissä kappaleissa esiteltiin ohutlevyrakenteen osakokonaisuuksien ja osien muutoksia uudelleen suunnittelussa. Tässä kappaleessa käydään läpi ilmanvaihtokoneen uudelleen suunnittelun ohutlevyrakenteen kokonaiset muutokset. Nämä muutokset pystyvät näkemään liitteen II sivun 1 taulukosta, jossa nähdään yhteensä osiossa kokonaiset muutokset kaikista osista. Kuvassa 43 nähdään uudelleen suunniteltu ohutlevyrakenne, joka on esitelty taulukossa.



Kuva 43. Uudelleen suunniteltu ilmanvaihtokoneen ohutlevyrunko.

Ilmanvaihtokoneen ohutlevyrakenteesta saatiin uudelleen suunnittelussa eliminoitua kuusi ohutlevy osaa. Mahdollisuus on myös eliminoida seitsemän osaa, jos väliseinä 1 ja suodatinkisko yhdistetään. Eliminoituja osia olivat korvake (2 kpl), kennon liu'un listat ulko-osa (2 kpl), roottorin sivupelti 2 ja suodatin kisko ylempi 2. Tämän ansiosta ohutlevyrunkoon

jäi 38 osaa, joista 4 on PVC-muovisia kylmäsiltaakatkoja. Ohutlevyosia on siis uudelleen suunnittelussa mallissa 34 kappaletta. Kriittisten ohutlevy osien määrä rakenteessa oli 13, kuten aiemmissa kappaleissa todettiin. Uudelleen suunnittelussa mallissa Lucaksen DFMA-analysoinnin suunnittelun tehokkuuden prosentti nousi siis 32,5 prosentista 38,24 prosenttiin (39,4 prosenttia, jos eliminoidaan suodatinkisko, jolloin jää 33 osaa).

Ilmanvaihtokoneen niittien lukumäärää pyrittiin myös vähentämään uudelleen suunnittelussa. Uudelleen suunnittelussa vähennettiin niittejä kohteista, joissa niitä esiintyi paljon ja korvattiin teippikiinnityksellä kohdissa mihin se soveltui. Kokonaisuudessaan niittejä vähennettiin ohutlevyrungon kokoonpanosta 20 kappaletta (tai 22 jos eliminoidaan suodatinkisko). Tulee kuitenkin huomioida, kun ilmanvaihtokoneen sisäkaton osakokonaisuuden valmistamista muokattiin, tuli niittejä kokoonpanoon lisää 20 kappaletta. Tällä menetelmällä kyettiin kuitenkin eliminoimaan epäluotettava pistehitsaus menetelmä pois sisäkaton valmistuksesta. Teippikiinnityksiä ohutlevyrunkoon tulee uudelleen suunnittelussa 6 kappaletta. Teippikiinnityksillä kyetään suorittamaan myös seinämien tiivistämiset, joten tiivistemassa ei enää tarvita näissä kohteissa.

Ulkokuoren osakokonaisuuden osia symmetrisoitiin uudelleen suunnittelussa, jotta ulkokuoren osat ovat suoraan käyviä vasen, että oikea kätisiin ilmanvaihtokoneisiin. Tällä muutoksella pyritään helpottamaan ja yksinkertaistamaan ulkokuoren osien valmistusta, sillä taittoja ei enää tarvitse kääntää eri kätisiä osia valmistaessa. Näin säästytään myös syntyviltä taitosvirheiltä valmistuksessa. Symmetrisointia toteutettiin myös lähtökauluksissa. Lähtökauluksien leikkuut toteutetaan nykyisessä mallissa peltileikkurilla. Leikkuita ei ole koneistettu vaan ne suoritetaan käsin, joko kerta eri lailla. Tämän vuoksi uudelleen suunnittelussa lähtökauluksien leikkuut on suunniteltu symmetrisiksi jokaiseen lähtökaulukseen. Symmetrisoiduissa osissa leikkuu on neliö muotoinen. Leikkuu prosessi suoritettaisiin uudelleen suunnittelussa mallissa prässikoneella lävistyksenä. Myös lähtökauluksien kiinnitys on suunniteltu uudelleen. Niittikiinnitystä varten lähtökauluksiin on suunniteltu symmetrisesti neljä reikää, jotka valmistetaan myös lävistämällä prässissä.

6.1 Uudelleen suunnitellun mallin prototyypiosat

Uudelleen suunnitellusta mallista valmistettiin ohutlevy prototyypiosia. Ilmanvaihtokoneen rungosta valmistettiin ohutlevyosat, jotka eivät tarvitseet muovaamista. Prototyypin valmistaminen suoritettiin Lappeenrannan yliopiston laboratoriossa käyttäen sähkösinkittyä terästä. Valmistuslaitteistona käytettiin levytyöstökeskusta, jossa on integroituna lasertyöstöpää ja särmäslaitteistoa.

Prototyyppejä valmistaessa kyettiin myös havainnoimaan valmistuksellisia seikkoja mallin valmistuskuvista. Valmistuskuvissa on äärimmäisen tärkeää, että taittojen suunnat on tarkasti merkitty ilmanvaihtokoneen uudelleen suunnitelluissa osissa, koska väärään suuntaan taittamisen riski on vielä suuri muutamissa osissa. Valmistaessa prototyyppejä havainnoitiin myös, että osien symmetroiminen helpottaa valmistusta osia taivuttaessa, sillä taivutussuunnilla ei ole tällöin väliä. Valmistaessa syntyi taittovirheitä ja taivutussädettä 1,6 mm ei kyetty valmistamaan 1,25 mm paksuihin levyihin puuttuvien työkalujen takia, joten taivutussädettä 2 mm käytettiin prototyypin 1,25 mm ja 1,5 mm paksuissa levyissä. Tämä aiheutti ulkokuoren mittojen heittoa ja pilasi osan.

Prototyypistä kyettiin myös havainnoimaan muutamia suunnitteluvirheitä, joita olivat samansuuntaisten vierekkäisten taittojen liian suuret välykset, liian pieniä reikiä 2 sijainnissa ja symmetroimisen viimeistely. Nämä virheet korjattiin heti ne havaittua. Prototyypin osat toimitettiin kohdeyritykselle tarkempia tutkimuksia varten.

7 TULOSTEN ARVIOINTI JA JATKOKEHITYSEHDOTUKSET

Työn tuloksia kyetään arvioimaan uudelleen suunnittelusta, niin konkreettisesti, kuin teoreettisesti. Ilmanvaihtokoneen uudelleen suunnittelulla on kyettyä vähentämään osalukumäärää, kokoonpanon läpimenoaika ja korvaamaan vaikeita valmistuksen vaiheita, sekä yksinkertaistamaan yrityksen tuotteen valmistamista. Uudelleen suunnittelussa onnistuttiin yksinkertaistamaan tuotetta ja tavoitteellisiin muutoksiin päästin, mutta esiintyi työn edetessä myös jatkotutkimuskohteita. Tässä kappaleessa tullaan vielä tarkemmin analysoimaan mitä muutoksia työn tuloksilla saatiin aikaan, mitä johtopäätöksiä luotiin ja mitkä ovat työn jatkotutkimuskohteet.

7.1 Tulosten analysointi

Tarkastellessa ilmanvaihtokoneen ohutlevyrunkoa DFMA:n analysoinnin osalta, voidaan sanoa, että tuotesuunnittelua saatiin tehostettua, muttei tavoitteeseen päästy. Ohutlevyosista väheni 6 osaa, joka nosti Lucaksen DFMA-analysoinnin suunnittelun tehokkuuden prosenttien 32,5 prosentista 38,24 prosenttiin (39,4 prosenttia, jos eliminoidaan suodatinkisko, jolloin jää 33 osaa). Suunnittelun tehokkuuden prosentti jäi työssä alle 45 % mitä pidettiin rajana tehokkaalle suunnittelulle. Jotta 45 % olisi saavutettu, olisi työssä pitänyt vähentää 11 ohutlevy osaa. Yksittäisten osien tarkemmat muutokset ja tulokset on ilmoitettu liitteen II sivun 1 taulukossa ja jokaisen osan muutoskuvien alapuolella sijaitsevilla taulukoissa.

Uudelleen suunnittelussa suoritettiin myös kiinnikkeiden vähentämisestä ja korvaamisesta. Niittejä saatiin kokonaisuudessaan vähennettyä 20 kappaletta. Niittien vähennyksen määrä jäi alhaiseksi, kun sisäkaton ja lähtökaulusien välinen pistehitsaus liitos päätettiin korvata niitti liitoksilla. Tämä liitoksen korvaaminen toi kokoonpanoon 20 uutta niitti kiinnitystä. Kuitenkin niittikiinnitys ratkaisuja kyettiin korvaamaan uudelleen suunnittelussa teippi ja SnapLock™-kiinnityksillä. Teippikiinnitykset, joita oli 5 kappaletta, tulevat korvaamaan 13 niittiä ja 5 SnapLock™-kiinnityksellä korvataan 5 niittiä. Molemmilla kiinnitysratkaisuilla on kaksoistarkoitus kokoonpanossa. Teippikiinnityksellä kyetään korvaamaan, niin niitit, kuin tiivistemassa liitos kohdissa. SnapLock™-kiinnityksillä on tarkoituksena korvata niittikiinnitykset ja pitää osakokoonpanoja oikeilla paikoillaan niittikiinnityksien ajan. Tällä varmistetaan kokoonpanoajan nopeutuminen ja kokoonpanija työn helpottaminen.

Sisäkaton ja lähtökauluksen uudelleen suunnittelun muutoksilla kyettiin eliminoimaan lähtökauluksen leikkuu-, poraus- ja pistehitsausprosessit. Entisessä mallissa yrityksen tiloissa suoritettiin 5 lähtökauluksen leikkaus muotoonsa, lähtökauluksiin porattiin 14 niitin mentävää reikää ja pistehitsausprosessissa suoritettiin 6 tai 7 pistehitsiä per kaulus. Koko sisäkaton valmistuksen on ajateltu vievän n. 30 % koko kokoonpano ajasta. Tämä prosentuaalinen arvio on määritelty yrityksen kanssa. Uudelleen suunnittelussa sisäkaton kokoonpanon on ajateltu toimivan niin, että lähtökaulukset tulevat toimittajalta jo valmiiksi muotoiltuina. Lähtökaulukset sijoitetaan, kokoonpanoa helpottavaan muottiin (jigiin), jossa lähtökauluksen sijainnit ja asennot ovat lukittuna oikeisiin kohtiin. Lähtökauluksen tasopinnalle laitetaan tiivistemassat ja sen jälkeen muottiin, lähtökauluksen päälle, asetetaan sisäkaton uudistettu osa. Tämän jälkeen tulee tiivistemassa levittää tuloilmapuhallinaukon sovitepelti osan kohtaan. Sitten tuloilmapuhallinaukon sovitepelti osa laitetaan paikoilleen ja aloitetaan niittausprosessi. Niittaus toteutetaan 4 niitillä per kaulus ja tuloilmapuhallinaukon sovitepelti niitataan vielä 2 erillisellä niitillä. Tämän sisäkaton valmistusprosessin on ajateltu vievän 80 % vähemmän aikaa yrityksen toiminnassa, kuin nykyisessä mallissa.

Symmetrisointien toimivuutta voidaan arvioida suuremman massatuotannon jälkeen, jolloin voidaan arvioida virheiden määrien väheneminen valmistuksessa. Kuitenkin työn lopputuloksesta pyritään määrittelemään se, että virheiden määrä tulee vähentymään yrityksen tuotannossa, symmetrisoinnin ja yksinkertaistamisen johdosta. Symmetrisoinnilla kyetään myös vähentämään varastoinnin tarvetta, koska symmetriset osat käyvät kaikkiin tuotteisiin eikä niitä tarvitse eritellä varastoinnissa käsitelyksien mukaan. Kokonaisuudessaan uudelleen suunnittelussa kyettiin säästämään kokoonpanossa aikaa arviolta 30 % verran. Sisäkaton osakokonaisuuden muuttaminen tuo arviolta 24 % muutoksen ja muut uudelleen suunnittelun osien vähentäminen, sekä symmetrisointi tuo kokonaisuudessaan arviolta 6 % muutokset läpimenoaikaan. Osien materiaali- ja valmistuskustannuksissa ei kyetty luomaan säästöjä uudelleen suunnittelun kautta.

Uudelleen suunnittelun kokonaiset muutokset tuotteen läpimenoaikaan on siis yhden kolmasosan vähentymisen luokkaa. Kuitenkin uudelleen suunnittelun tuomat muutokset ovat sen verran radikaaleja, että tuotantolinjoihin voidaan tehdä suuria muutoksia. Osien

vähentäminen ja symmetroiminen synnyttää tuotantolinjassa varastoinnin tarpeen vähenemistä. Tämä avaa tuotantolinjaan lisää tilaa ja muutoksen varaa. Tuotantolinjasta voidaan myös uudelleen suunnittelun ansiosta eliminoida pistehitsaus- ja peltileikkuupisteet. Tämä on suuri muutos tuotantolinjaan ja ei pelkästään nopeuta tuotteen valmistusaikaa, vaan vähentää myös huomattavasti tuotteen valmistuksessa syntyvää sivuaikaa, joka tarkoittaa työntekijän liiketoimintoja ja omaa valmistuksen säätämistä. Konkreettisia muutoksia voidaan arvioida tässä työssä, kuten edellä on jo mainittu, mutta uudelleen suunnittelu voi synnyttää myös kumulatiivista muutosta yrityksen tuotantolinjastossa, jota ei voida mitata tässä työssä. Positiivinen kumulatiivinen muutos voi syntyä yrityksen muutoksista tuotantolinjaan, kun kaikkia uudelleen suunnittelun muutoksia toteutetaan tuotannossa. Läpimenoajan positiivinen muutos ei siis välttämättä rajoitu pelkästään arvioituihin konkreettisiin muutoksiin.

7.2 Tutkimuksen luotettavuus, mittausmenetelmien osuvuus ja virhetarkastelu

Uudelleen suunnitellusta ilmanvaihtokoneesta tullaan valmistamaan prototyyppi, jonka kokoonpanoa ja toimivuutta voidaan tällöin testata. Testauksessa tulee huomioida kokoonpanon läpivienti aikaa, sekä kokoonpantavuuden helppoutta. Teoreettisessa tarkastelussa, jota on suoritettu tämän työn tuloksissa, voidaan pitää vain suuntaa antavina karkeina tuloksina ilman kunnan testauksia prototyypillä.

Uudelleen suunnitellussa mallissa voi myös ilmetä mittojen uudistumisia vanhoihin malleihin verrattuna. Ilmanvaihtokoneen 3D-mallinnus vaiheessa suoritettiin osakohtaisten mittojen tarkentaminen työntömitalla ja rullamitalla. Tämän vuoksi osissa voi ilmentyä virheellisiä mittoja joissain osissa. Kuitenkin ilmanvaihtokoneen kriittiset ulkomitat on saatu 2D-mallista, jonka yritys on toimittanut tätä työtä varten ja niissä ei ole heittoa.

Ilmanvaihtokoneen prototyyppiosista kyettiin havaitsemaan malleissa, mittavirheitä, jotka löytymisen jälkeen korjattiin malliin. Mittavirheitä ilmeni sisäosien reunojen taittojen välyksissä, muotoilujen sijainneissa, kokonais leveyksissä ja reikien mitoissa. Nämä mitoitusvirheet havaittiin ja muutettiin prototyypin jälkeen.

7.3 Jatkotutkimuskohteet

Työssä kyettiin yksinkertaistamaan ilmanvaihtokoneen rakennetta, mutta jatkotutkittavaa jäi työn jälkeenkin. Työssä keskityttiin tärkeimpiin vaadittuihin muutoskohteisiin. Työssä esiteltiin muutamia jatkosuunniteltavia kohteita. Ulkokuoren pohjaa ei symmetrisoitu täysin, koska ulkokuoren pohjaan sijoitettavien kondenssiveden venttiilien reikien symmetroiminen tulisi varmentaa ilmanvaihtokoneen toiminnallisuuden kautta. Pystyttäisiinkö nämä reiät sijoittamaan keskelle osaa vai suoritettaisiinko symmetroiminen niin, että molemmille puolille sijoitetaan venttiilin reiät, jolloin kokoonpanossa toinen niistä rei'istä suljetaan. Ulkokuoren osakokonaisuuden symmetrisointi olisi huomattava parannus ohutlevyrakenteen valmistamisen kannalta.

Ilmanvaihtokoneessa ilmenee lähtökauluksen kanssa kolme eri osaa, jotka syvä vedetään. Näitä osia ovat sisäkuoren pohja, roottorin sivupelti 1 ja uusi roottorinsivupelti 2. Syväveto on valmistusprosessina kallis ja sen korvaamista muilla valmistusmenetelmillä tulisi harkita, jos se olisi mahdollista. Lähtökauluksen tapauksessa syväveto on ainoa järkevä valmistusmenetelmä, mutta muissa kolmessa syvävedettävässä osassa voisi, ehkä suorittaa osien muovaamisen eri lailla. Roottorin sivupellit syvä vedetään, jotta saadaan muodostettua 13 mm korkea kaulus. Tähän kaulukseen tiivistetään pyörivän lämmönvaihtimen ilmanavien tilat. Tiivistys tapahtuu tekonahkalistalla, joka kiinnittyy pyörivän lämmönvaihtimen ja roottorin sivupeltien kauluksien kylkiin. Tässä kohtaa tulisi miettiä voitaisiinko tällainen tiivistäminen toteuttaa roottorin sivupeltiin, jollain muulla valmistusmenetelmällä luotuun muotoon. Muulla valmistusmenetelmällä tarkoitetaan levytyökeskuksen työkaluilla tapahtuvaa muovausta, jolloin osat valmistettaisiin samalla kertaa suurimman osan ohutlevyrakenteen osien kanssa.

Sisäkaton osakokonaisuuden kehittämistyötä tulisi myös viedä jatkokehityksessä eteenpäin. Lähtökauluksen tiivistäminen on ollut keskusteluissa jo pidemmän aikaa ja sen mahdollisuuksiin tulisin vielä syventyä. Tiivistemassan korvaamista teippiratkaisuilla tulisi tutkia. Mahdollisia toteutuksia löytyy kyllä, mutta kyseisten mallien kustannukset ja kokoonpantavuudet tulisi vertailla ja kilpailuttaa. Tällä hetkellä lähtökauluksen symmetroimisen ja niittikiinnityksien ansiosta tiivistysmassa voidaan tuoda lähtökauluksen alapuolelle ja se jo itsessään parantaa lähtökauluksen tiiveyttä.

8 YHTEENVETO

Uudelleen suunnittelussa kyettiin vaikuttamaan ilmanvaihtokoneen kriittisiin muutostarpeellisiin kohteisiin. Yhteistyössä yrityksen kanssa keskityttiin muuttamaan kohtia, joita yrityksen toiminnasta haluttiin muuttaa. Diplomityössä suoritettiin myös ilmanvaihtokoneen 3D-mallintaminen SolidWorks-ohjelmistolla. Näistä mallinnetuista osista kyettiin analysoimaan DFMA:n mukaisia muutos kohteita. Muutoskohteista neuvoteltiin kohdeyrityksen kanssa ja yhdessä päätettiin, mitkä muutokset toteutetaan uudelleen suunniteltuun malliin. Uudelleen suunnittelussa kyettiin luomaan ilmanvaihtokoneesta malli, jossa esiintyy vähemmän osia ja kokoonpanon tarvetta. Tästä uudelleen suunnitellusta ilmanvaihtokoneesta luotiin Lappeenrannan teknillisen yliopiston laboratoriossa prototyyppi. Prototyypin kokoonpanosta kyettiin vielä tarkastelemaan mikä kokoonpanovaihe vie minkäkin ajan suorittaa.

Suurin muutoksen tarve yrityksellä oli sisäkaton osakokonaisuuden valmistamisessa ja kokoonpanossa. Sisäkaton osakokonaisuuteen keskityttiin uudelleen suunnittelussa paljon. Työssä saatiin muokattua sisäkaton rakennetta ja sen valmistettavuutta huomattavasti. Sisäkaton valmistus- ja kokoonpanomenetelmiä muutettiin, sekä sisäkaton rakennetta pyrittiin yksinkertaistamaan. Toinen suuri muutoksen tarve oli ulkokuorien osien symmetrisoiminen. Tässä muutoksessa onnistuttiin melkein, koska ulkokuoren venttiilien reikien sijainnit toimivuudeltaan tulee vielä tarkastaa jatkotutkimuksissa.

DFMA:n näkökohdista uudelleen suunnittelussa toteutettiin ilmanvaihtokoneen yksinkertaistamista. Yksinkertaistamisen toimenpiteistä osien ja kiinnikkeiden vähentämistä, monitoimisten osien hyödyntämistä, valmistus- ja kokoonpanomenetelmien yksinkertaistamista, sekä kokoonpano suuntien yhdyntämistä, hyödynnettiin uudelleen suunnittelussa. Ohutlevyosia vähennettiin ilmanvaihtokoneen rakenteesta 6 kappaletta. Niittejä ilmanvaihtokoneen kokoonpanosta vähennettiin 20 kappaletta. Uusia monitoimisia kiinnikeratkaisuja hyödynnettiin uudelleen suunnittelussa (kaksipuolinen teippi ja SnapLock™). Osia symmetrisoitiin ilmanvaihtokoneen rakenteesta, jotta valmistamista voidaan yksinkertaistaa ja nopeuttaa (ulkokuori ja lähtökaulukset). Myös yrityksen ilmanvaihtokoneeseen suoritettavia toimenpiteitä pyrittiin yksinkertaistamaan.

Toimenpiteiden yksinkertaistamisessa kyettiin eliminoimaan epäluotettava pistehitsausmenetelmä. Pistehitsaus korvattiin niittiliitoksilla, joita toteutetaan entuudestaan jo paljon muussakin rakenteen kokoonpanojen vaiheissa.

Näiden uudelleen suunniteltujen uudistuksien johdosta ilmanvaihtokoneen läpivienti aika tulee vähenemään ja valmistuskustannuksia kyetään säästämään. Yrityksen toiminnassa kokoonpano on suuressa osassa ja uudelleen suunnittelussa kyettiin vähentämään kokoonpantavia osia, vähentämään kiinnikkeiden kokonaismäärää, lisäämään monipuolisia kiinnikeratkaisuja ja yksinkertaistamaan kokoonpanoprosessia. Itse kokoonpanoprosessiin ehdotettiin myös pieniä muutoksia uuden sisäkaton myötä. Uudelleen suunnittelun muutokset vaikuttavat suuresti yrityksen ilmanvaihtokoneen tuotantoon suorasti, sekä se voi myös vaikuttaa kumulatiivisesti. Työn arvioidut muutokset ja vaikutukset ovat teoreettisia ja niitä tulisi testata yrityksen toiminnassa tarkemmin. Työn tuloksiin kuitenkin voidaan olla tyytyväisiä, sillä kriittiset muutoksen tarvitsevat kohteen kyettiin uudelleen suunnittelemaan, sekä valmistuksen, että kokoonpanon kannalta.

Jatkokehityksessä tulee viedä tämän työn asioita vielä eteenpäin. Muutos kohtia pyrittiin tässä työssä rajaamaan kaikista kriittisimpiin kohtiin, jotta niihin pystyttäisiin keskittymään tarkemmin. Tämän vuoksi jatkokehitettäviä asioita jäi vielä toteutettavaksi. Työssä valmistetun prototyypin tarkemman testauksen jälkeen tulee vielä enemmän informaatiota muutoksien toimivuudesta ja jatkokehityskohteiden tarpeellisuudesta.

LÄHTEET

Bettles, I. 1992. Design for manufacture & assembly (DFMA)-the Boothroyd & Dewhurst approach. 3rd International Conference on Competitive Performance Through Advanced Technology - FACTORY 2000. Lontoo. Iso-Britannia. 27-29.7.1992. Lontoo. Iso-Britannia. IEE conference publication. S. 316-321

Biesek, F. L. & Ferreira, C. V. 2016. A Model for Advanced Manufacturing Engineering in R&D Technology Projects Through DFMA and MRL Integration. International Conference on Transdisciplinary Engineering. Parana Curitiba. Brasilia. 3-7.10.2016. Joinville. Brasilia. Advances in Transdisciplinary Engineering. S. 705-714.

Boothroyd, G., Dewhurst, P. & Knight, W. A. 2011. Product design for manufacture and assembly Computer-Aided Design. 3. painos. Boca Raton: CRC Press. 520 s.

Eskelinen, H. 2013. Advanced approaches to analytical and systematic dfma analysis. Acta Universitatis, Lappeenrantaensis 509: 104 s.

Groover, M. P. 2010. Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. 4. Painos. Hoboken: John Wiley & Sons. 1014 s.

Harik, R. F. & Sahmrani, N. 2010. DFMA+, a quantitative DFMA methodology. Computer-Aided Design and Applications, 7:5. S. 701-709.

Hidahl, J. W. 2002. [Luku 4:] DFMA/DFSS. Teoksessa: ReVelle, J. B. Manufacturing Handbook of Best Practices. [Boca Raton:] CRC Press. S. 69-85.

Kannan, T. R. & Shunmugam, M. S. 2009. Processing of 3D sheet metal components in STEP AP-203 format. Part I: feature recognition system, International Journal of Production Research, 47:4, S. 941-964.

Korkala, T., Laksola, J. & Salminen, M. 2002. Kiinteistön ilmastoinnin hoito ja huolto. 3. PAINOS. Lahti:Päijät-Paino Oy. 172 s.

Kuo, T. C., Huang, S. H. and Zhang, H. C. 2001. Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives. Computers & industrial engineering, 41:3. S. 241-260.

Mate precision tooling. 2017. Snap Lock. [Mate precision tooling:in www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 25.8.2017. [Viitattu 25.8.2017]. Saatavissa: http://cdn.mate.com/wp-content/uploads/2015/12/LIT00886_SB_SnapLock.pdf

Matilainen, J., Parviainen, M., Havas, T., Hiitelmä, E. & Hultin, S. 2011. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. Helsinki: Teknologiainfo Teknova. 387 s.

Nasr, E. A. & Kamrani, A. K. 2007. Computer Based Design and Manufacturing. New York: Springer Science & Business Media. 345 s.

SFS intec. Deep Drawing. 2017. [SFS intec:in www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 25.8.2017. [Viitattu 25.8.2017]. Saatavissa: https://www.sfsintec.biz/en/web/technologies___products/production_technologies/deep_drawing/prozess/prozess_1.html

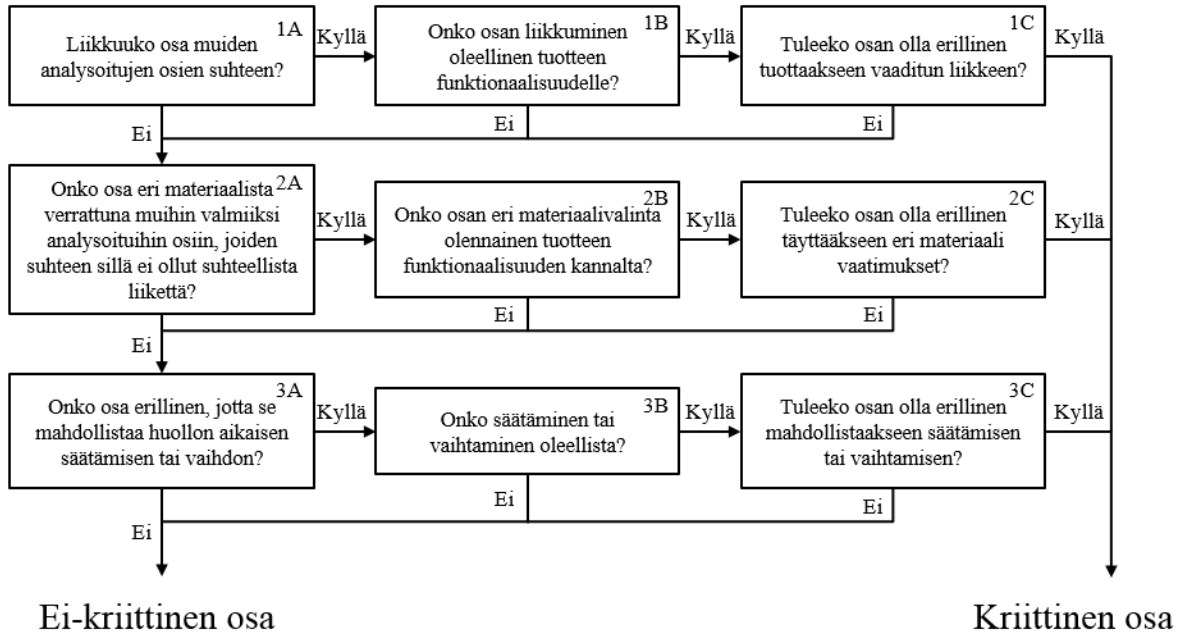
Selvaraj, P., Radhakrishnan, P. and Adithan, M. 2009. An integrated approach to design for manufacturing and assembly based on reduction of product development time and cost. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 42:1. S. 13-29.

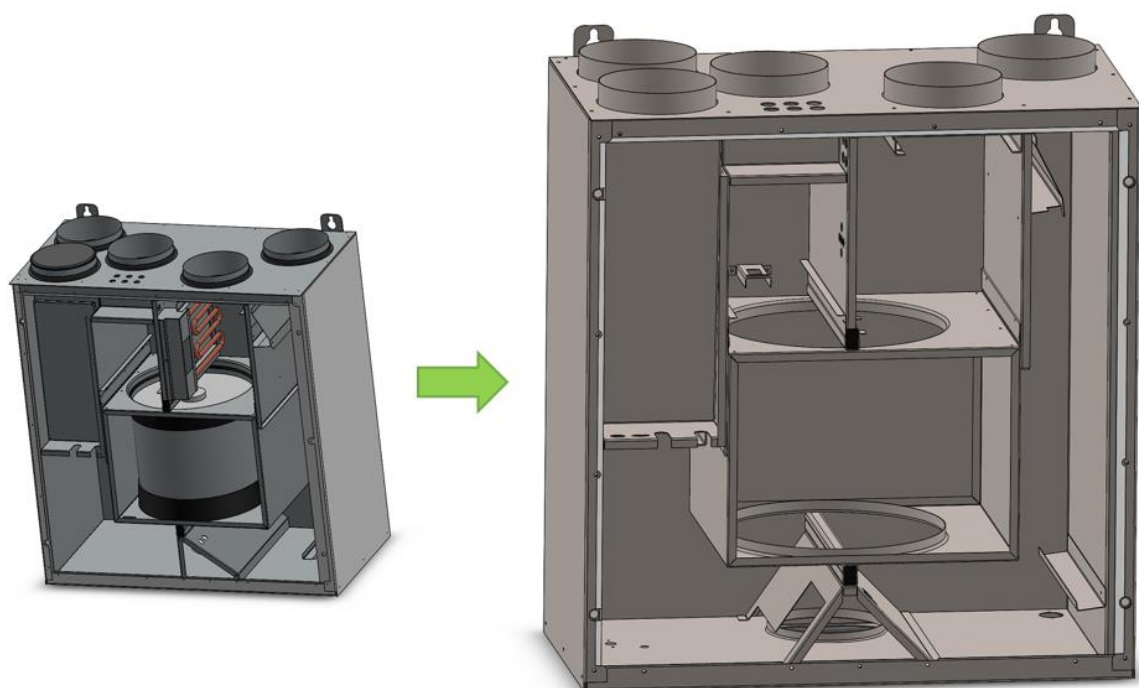
Suresh, P., Ramabalan, S. and Natarajan, U. 2016. Integration of DFE and DFMA for the sustainable development of an automotive component. International Journal of Sustainable Engineering 9:2. S. 107-118.

Soh, S. L., Ong, S. K. and Nee, A. Y. C. 2016. Design for assembly and disassembly for remanufacturing. Assembly Automation 36:1. S. 12-24.

Tesa. Product information. 2017. [Tesa:n www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 25.8.2017. [Viitattu 25.8.2017]. Saatavissa: <https://www.tesa.com/industry/tesa-acxplus-7808-black-line.html>

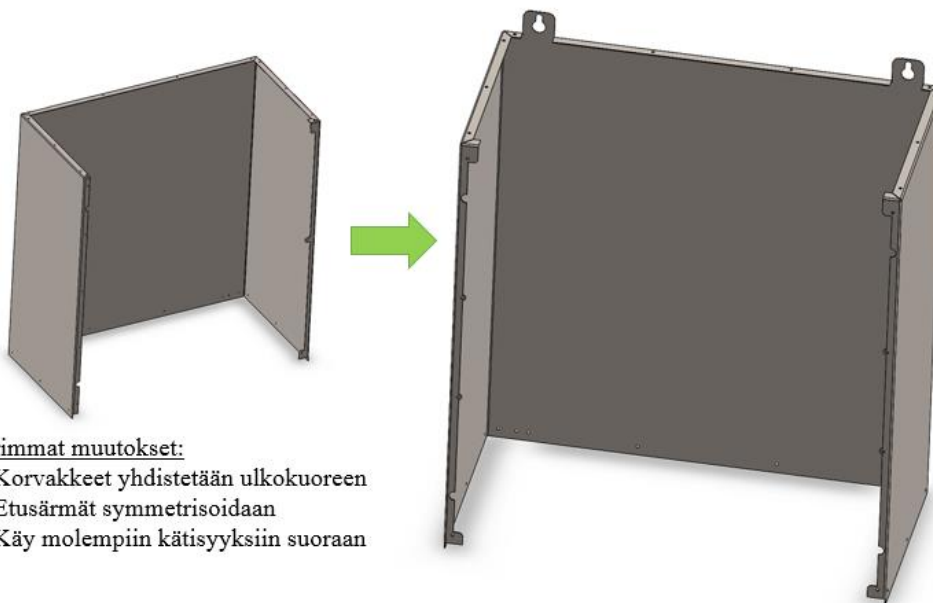
3M. Double sided bonding tapes. 2017. [3M:n www-sivuilla]. Viimeksi päivitetty 25.8.2017. [Viitattu 25.8.2017]. Saatavissa: https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~3M-X-Series-Hi-Performance-Double-Coated-Tape-XP6114?N=5002385+3293241097&rt=rud





Ohutlevyosien määrän vähennys	Niittien määrän vähennys	Uusien teippien määrä	Ohutlevyrungon paino	Taittojen määrä
6 tai 7	20 tai 22	5	30089,62 gr (29719,29)	128 (131)

Ulkokuori



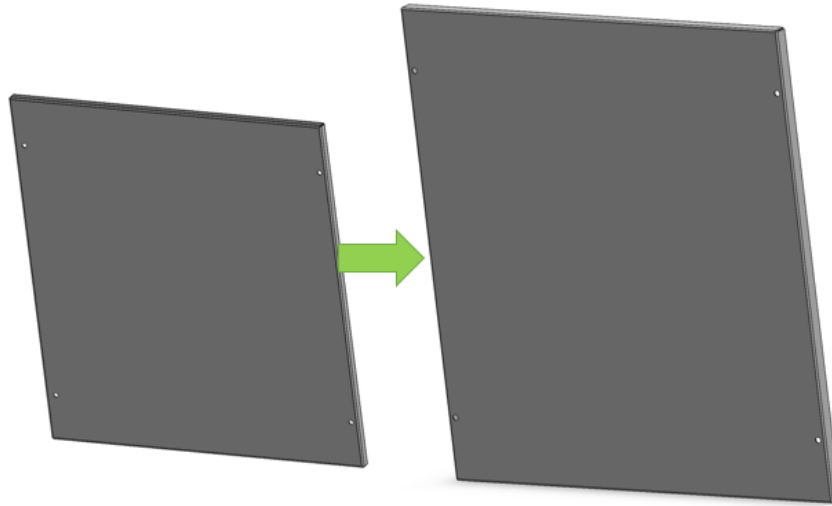
Suurimmat muutokset:

- Korvakkeet yhdistetään ulkokuoreen
- Etusärmät symmetrisoidaan
- Käy molempiin kätsisyksiin suoraan

Kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,25 maalattu	FeZn	1 (3)	7542.67 gr (7545.61)	32 (38)	0 (0)	34 (40)	9 (9)	16 (16)

Ulkokuoren ovi



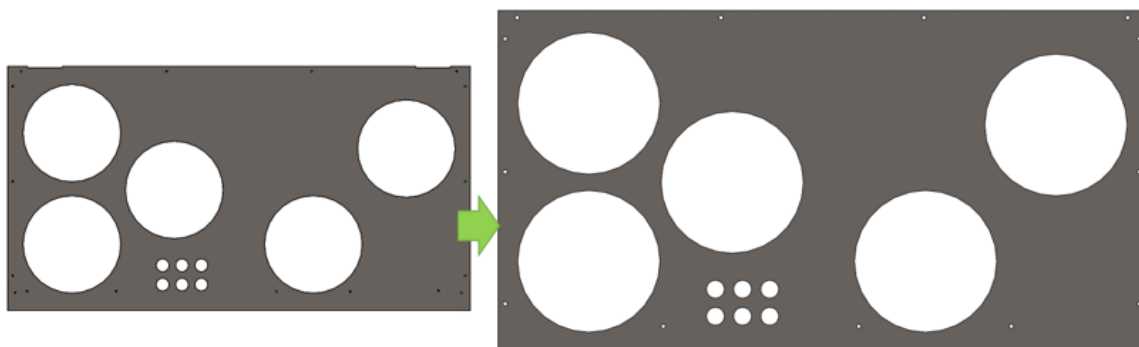
Suurimmat muutokset:

- Oven kiinnitysruuvien reikiä siirretään toiselta puolelta niin, että ne ovat symmetrisesti ovenssa
- Käy molempiin kätsisyyksiin suoraan

Kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,25 maalattu	FeZn	1 (1)	3920.87 gr (3920.87)	0 (0)	4 (4)	4 (4)	4 (4)	4 (4)

Ulkokuoren katto

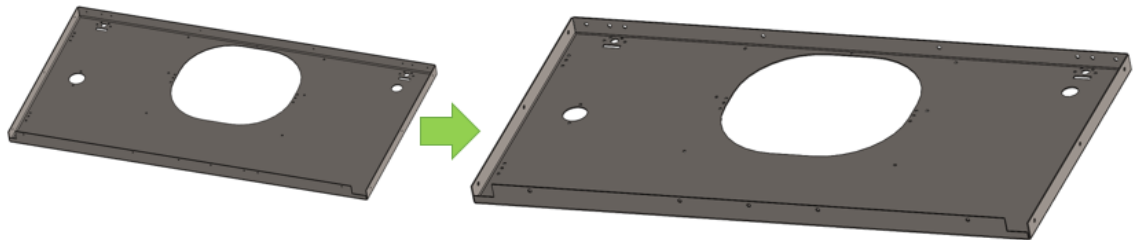
Suurimmat muutokset:

- Korvakkeiden leikkaukset poistetaan
- Niittien määrää vähennetään

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niittit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,25	FeZn	1 (1)	1199.34 gr (1199.57)	13 (17)	0 (0)	24 (28)	0 (0)	0 (2)

Ulkokuoren pohja



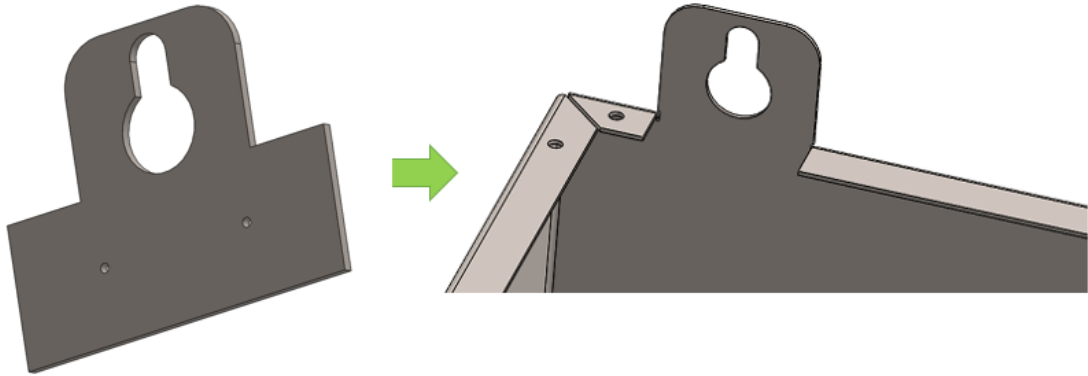
Suurimmat muutokset:

- Osan etusärmä symmetrisoidaan
- Osan muitakin geometrioita tulisi yrittää symmetrisioida
- Niittauksia vähennetään

Kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,25 maalattu	FeZn	1 (1)	1760.69 gr (1763.04)	19 (21)	0 (0)	58 (60)	4 (4)	6 (6)

Kiinnityskorvake



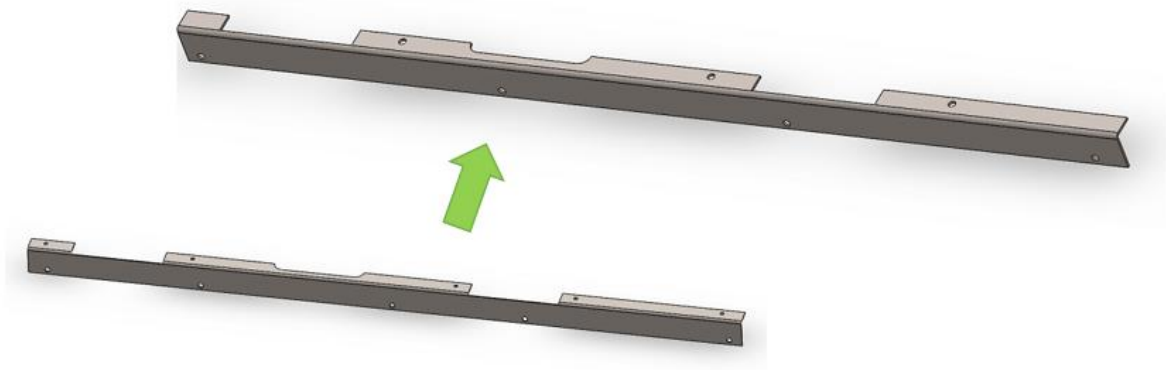
Suurimmat muutokset:

- Korvakkeet yhdistetään ulkokuoreen
- Osaa on eliminoitu uudelleen suunnittelussa

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
2	FeZn	-(2)	-(49.14)	-(2)	-(0)	-(4)	-(0)	-(0)

Ulkokuoren katon kiinnityslista



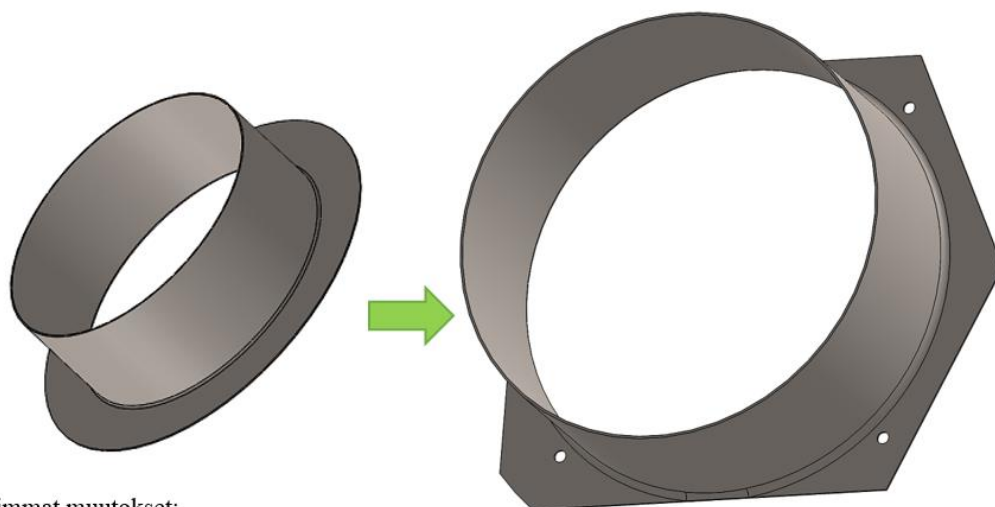
Suurimmat muutokset:

- Niittien lukumäärää vähennetään

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,25	FeZn	1 (1)	155.93 gr (156.07)	7 (10)	0 (0)	7 (10)	1 (1)	3 (3)

Lähtökaulus



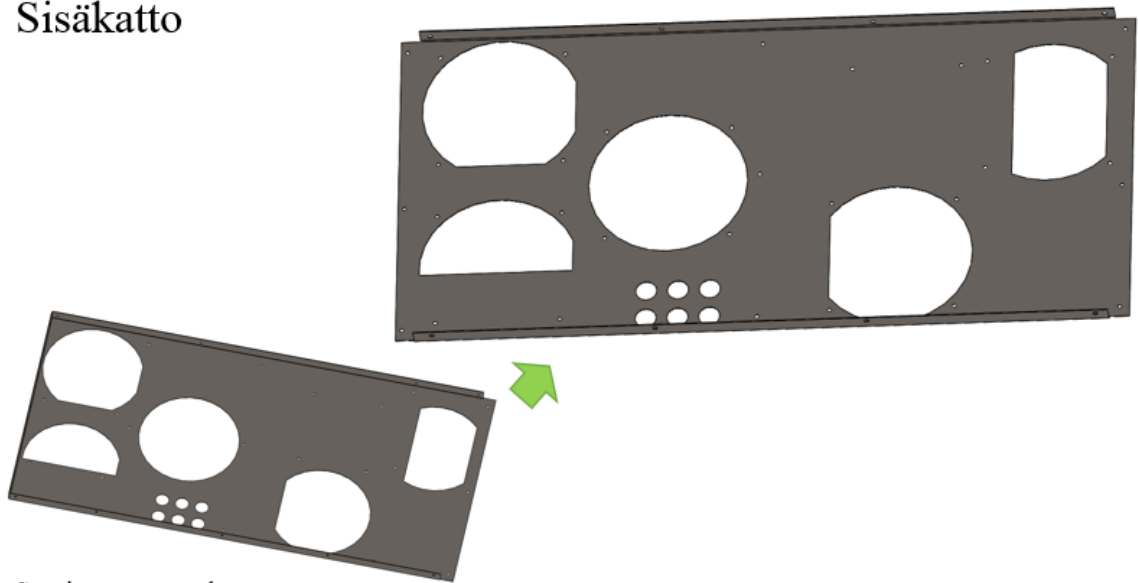
Suurimmat muutokset:

- Osien leikkuut symmetrisoidaan
- Leikkuut ja reikien teko suoritetaan prässillä lävistyksenä
- Kiinnitys sisäkattoon niiteillä ja pistehitsaus jätetään kokonaan pois valmistuksesta
- Lähtökaulusien tiivistys muutetaan kauluksen alapuoliseksi ja kokoonpanoa uudistetaan

Kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,7	FeZn	5 (5)	139.68 gr (162.67)	4 (0)	0 (0)	Ø125 ja 4 (0)	1 (1)	0 (0)

Sisäkatto

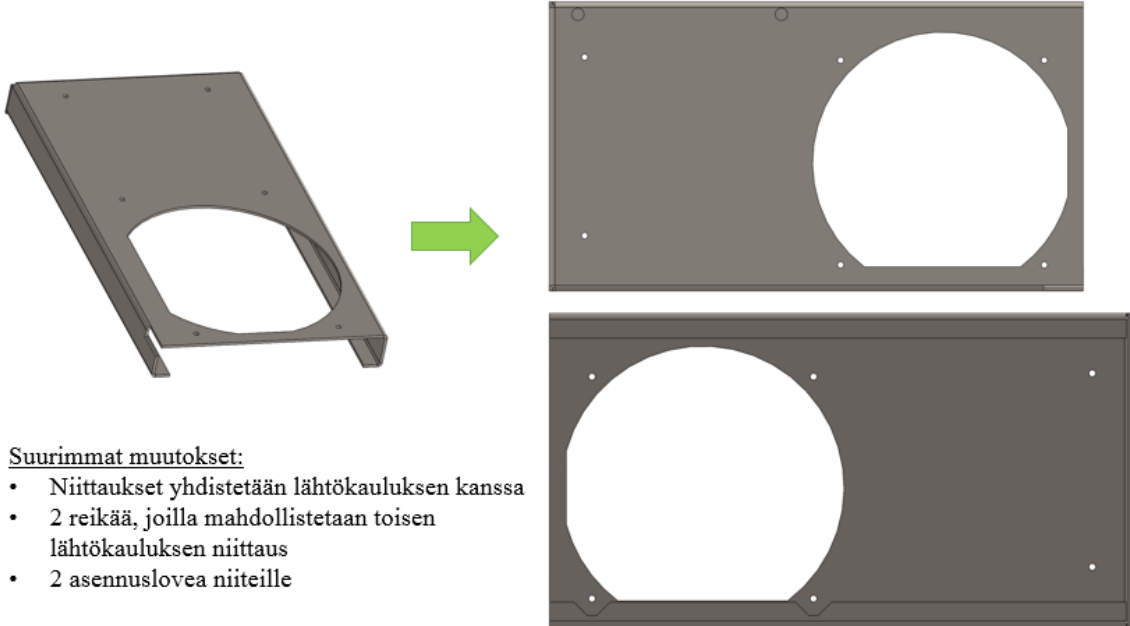
Suurimmat muutokset:

- Päädtyt valmistetaan tasomaisiksi (yksi taitto vähenee)
- Lähtökaulukset niitataan ei pistehitsata osaan
- Väliseinä 1, 4 ja 5 sekä sähkölaatikko ja johtokouru kiinnitetään teipeille osaan

Ei-riittävä osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	703.80 gr (703.89)	39 (38)	0 (0)	50 (49)	2 (3)	0 (2)

Tuloilmapuhaltimen tukilevy



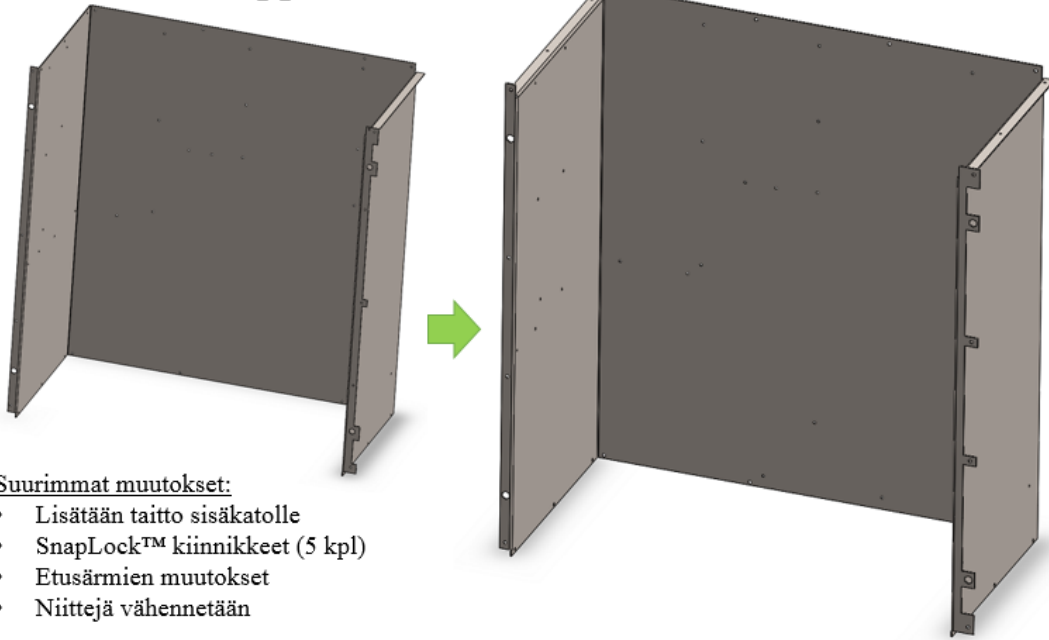
Suurimmat muutokset:

- Niittaukset yhdistetään lähtökauluksen kanssa
- 2 reikää, joilla mahdollistetaan toisen lähtökauluksen niittaus
- 2 asennuslovea niiteille

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1.5	FeZn	1 (1)	467.73 gr (469.77)	6 (6)	0 (0)	9 (7)	5 (5)	5 (3)

Sisäkuoren vaippa



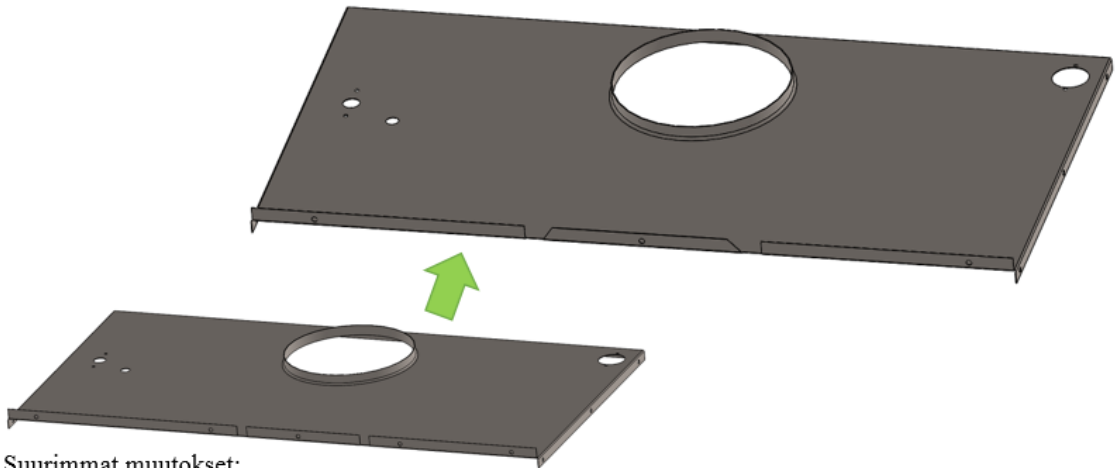
Suurimmat muutokset:

- Lisätään taitto sisäkatolle
- SnapLock™ kiinnikkeet (5 kpl)
- Etusärmien muutokset
- Niittejä vähennetään

Kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,5	FeZn	1 (1)	7940.4 gr (7962.4)	51 (59)	4 (4)	53 (63)	6 (5)	6 (4)

Sisäkuoren pohja

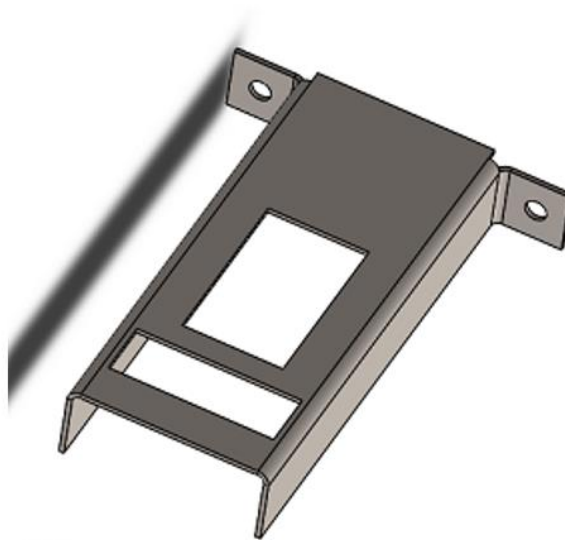
Suurimmat muutokset:

- Etusärmän lovien muutos
- Kiinnikkeiden vähentäminen

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	910.51 gr (906.45)	13 (15)	0 (0)	21 (23)	5 (5)	4 (4)

Anturin pidikelevy

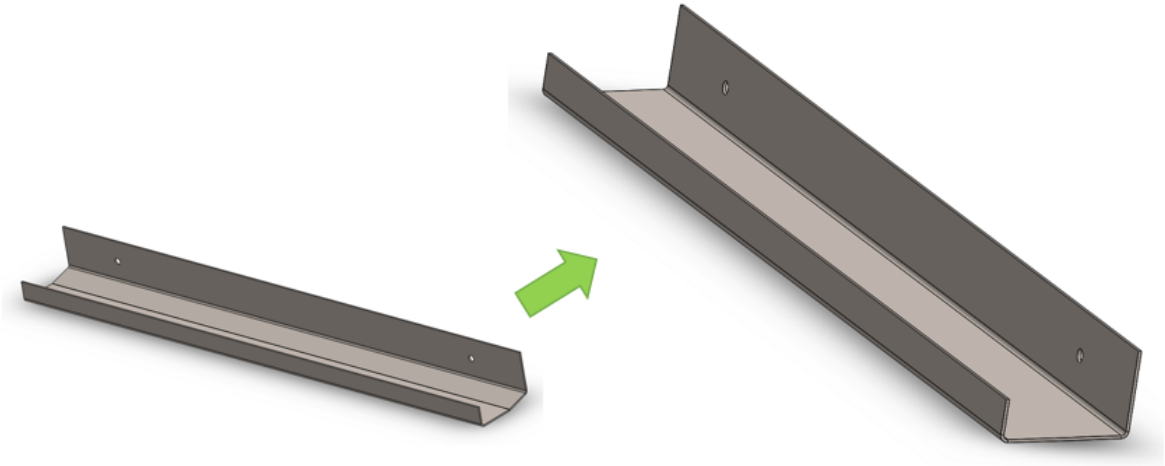
Suurimmat muutokset:

- Ei muutoksia uudelleen suunnittelussa

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,5	FeZn	1	14.83 grams	0		Ø3*2, 23*8, 2 14*24	4	3

Suodatinkisko



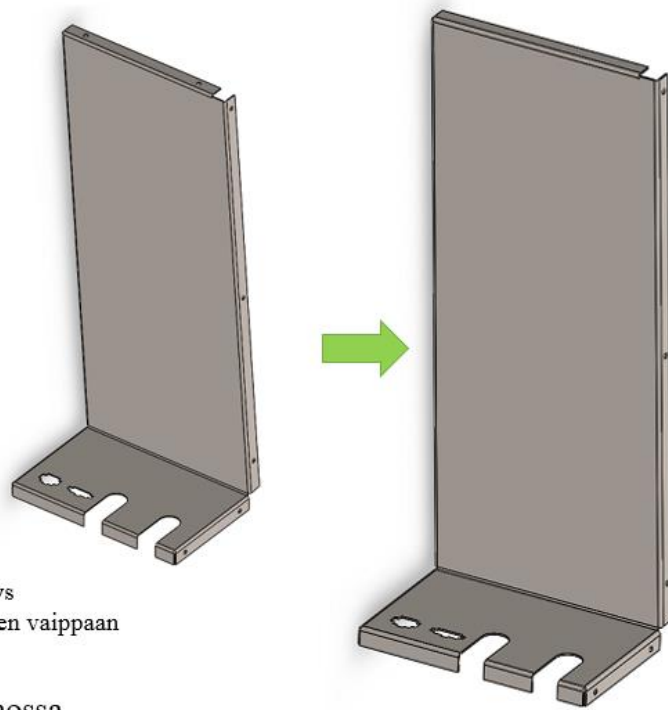
Suurimmat muutokset:

- Keskimmäinen taitto eliminoidaan ja taittojen kulmia uusitaan

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	94.75 gr (94,28)	2 (2)	0 (0)	2 (2)	2 (3)	0 (0)

Sähkölaatikko

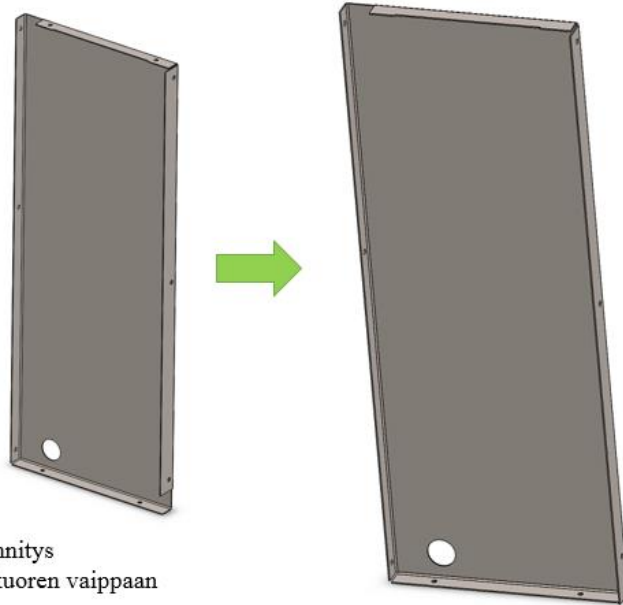
Suurimmat muutokset:

- Sisäkaton kanssa teippi kiinnitys
- SnapLock™ kiinnitys sisäkuoren vaippaan

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niittit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0.75	FeZn	1	480.29 gr (480.18)	9 (12)	0 (0)	11 (13)	7 (7)	6 (6)

Väliseinä 5

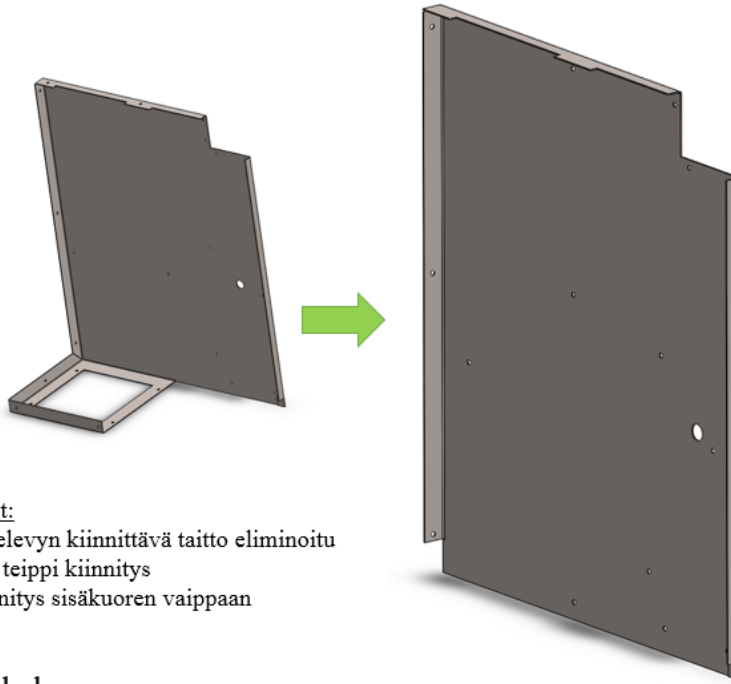
Suurimmat muutokset:

- Sisäkaton kanssa teippi kiinnitys
- SnapLock™ kiinnitys sisäkuoren vaippaan

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	325.14 gr (325.63)	7 (10)	0 (0)	9 (11)	4 (4)	4 (4)

Väliseinä 4

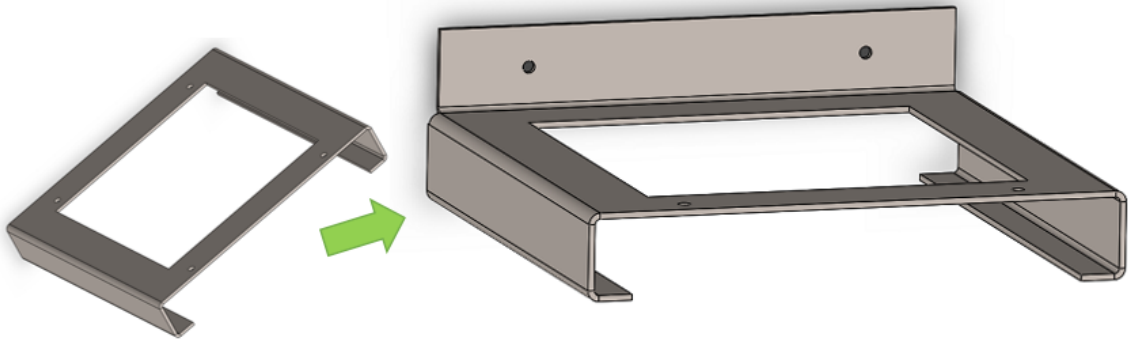
Suurimmat muutokset:

- Puhaltimen sovitelevyn kiinnittävä taitto eliminoitu
- Sisäkaton kanssa teippi kiinnitys
- SnapLock™ kiinnitys sisäkuoren vaippaan

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	602.91 gr (670.71)	14 (25)	1 (1)	15 (28)	4 (7)	3 (5)

Poistoilmapuhaltimen tukilevy



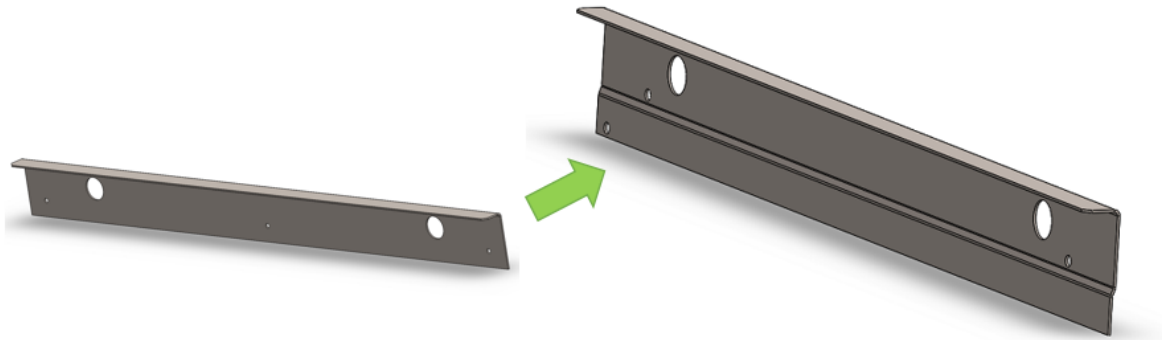
Suurimmat muutokset:

- Uusi taitto, josta kiinnitetään puhaltimen sovitelevy sisäkuoren vaippaan
- Kiinnitys niiteillä suoraan väliseinä 5 kanssa

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,5	FeZn	1 (1)	207.67 gr (176.91)	4 (4)	0 (0)	5 (5)	5 (4)	2 (0)

Kennon liu'un listat sisäosa 2



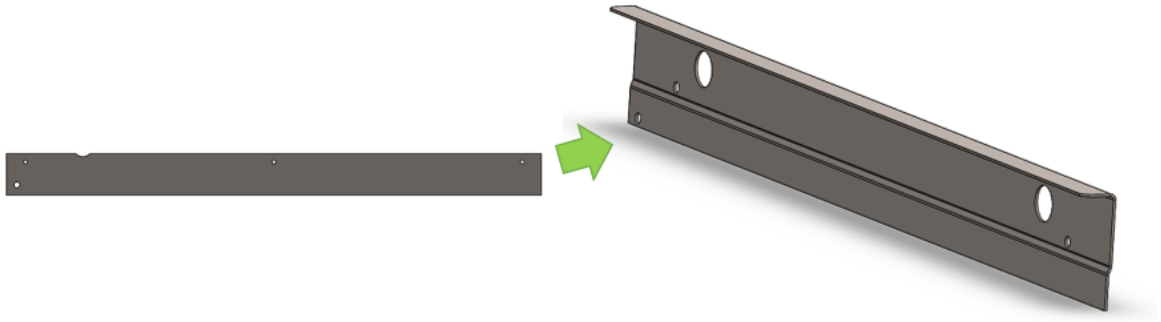
Suurimmat muutokset:

- Osa yhdistetään kennon liu'un listat ulko-osan kanssa
- Levyn paksuinen off-set muovaus
- * taulukossa esitetyt arvot yhdistävät Kennon liu'un listat osien ominaisuudet ja vertaa niitä yhdistyneeseen malliin

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (2)	65.04 gr (73.59*)	2 (3)	1 (1)	5 (9)	1 (1)	0 (0)

Kennon liu'un listat ulko-osa



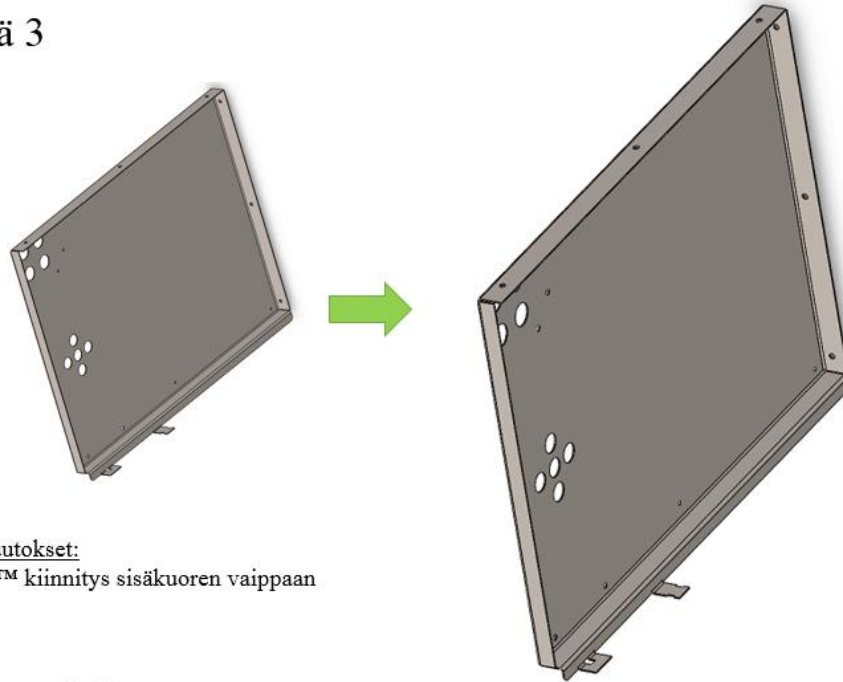
Suurimmat muutokset:

- Osa yhdistetään kennon liu'un listat sisäosa 2 kanssa
- Levyn paksuinen off-set muovaus
- * taulukossa esitetyt arvot yhdistävät Kennon liu'un listat osien ominaisuudet ja vertaa niitä yhdistyneeseen malliin

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (2)	65.04 gr (73.59*)	2 (3)	1 (1)	5 (9)	1 (1)	0 (0)

Väliseinä 3

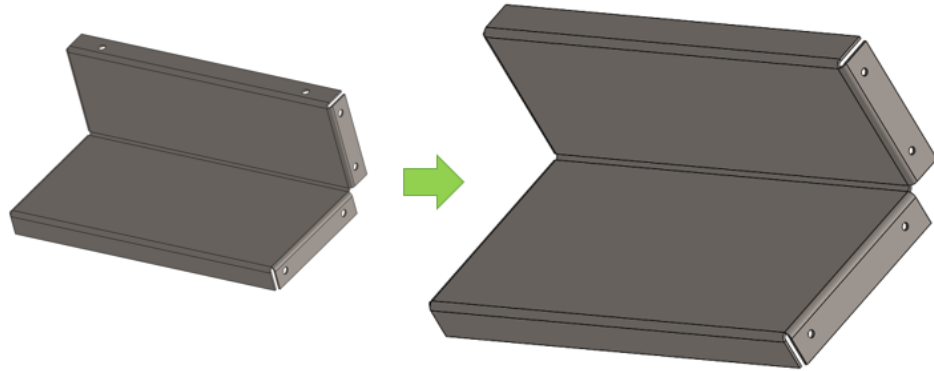
Suurimmat muutokset:

- SnapLock™ kiinnitys sisäkuoren vaippaan

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	388.31 gr	10 (11)	2 (2)	20 (20)	6 (6)	8 (8)

Johtokouru



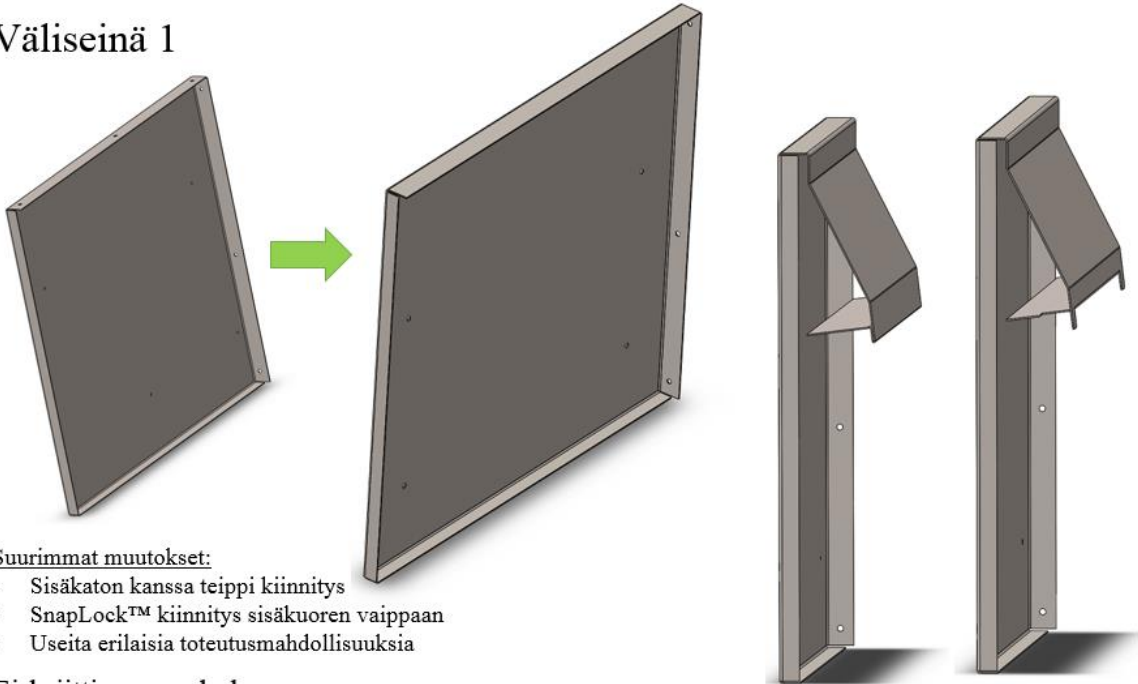
Suurimmat muutokset:

- Teippikiinnitys sisäkaton kanssa

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	91.37 gr (91.29)	7 (9)	0 (0)	7 (9)	7 (7)	6 (6)

Väliseinä 1

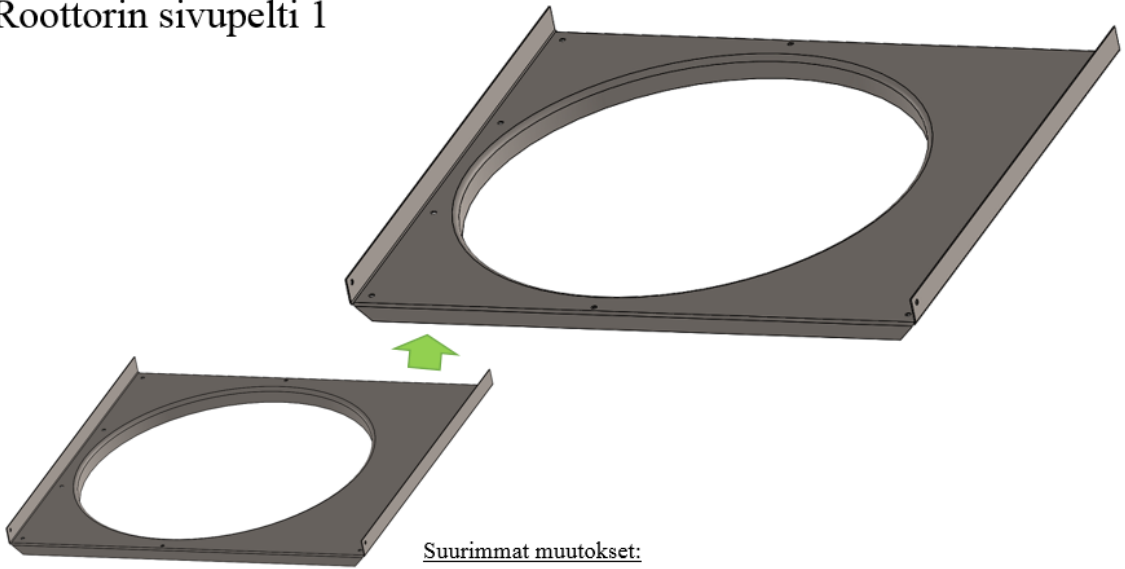
Suurimmat muutokset:

- Sisäkaton kanssa teippi kiinnitys
- SnapLock™ kiinnitys sisäkuoren vaippaan
- Useita erilaisia toteutusmahdollisuuksia

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	488.93 gr (456.55)	6 (11)	1 (1)	8 (12)	4 (4)	4 (4)

Roottorin sivupelti 1

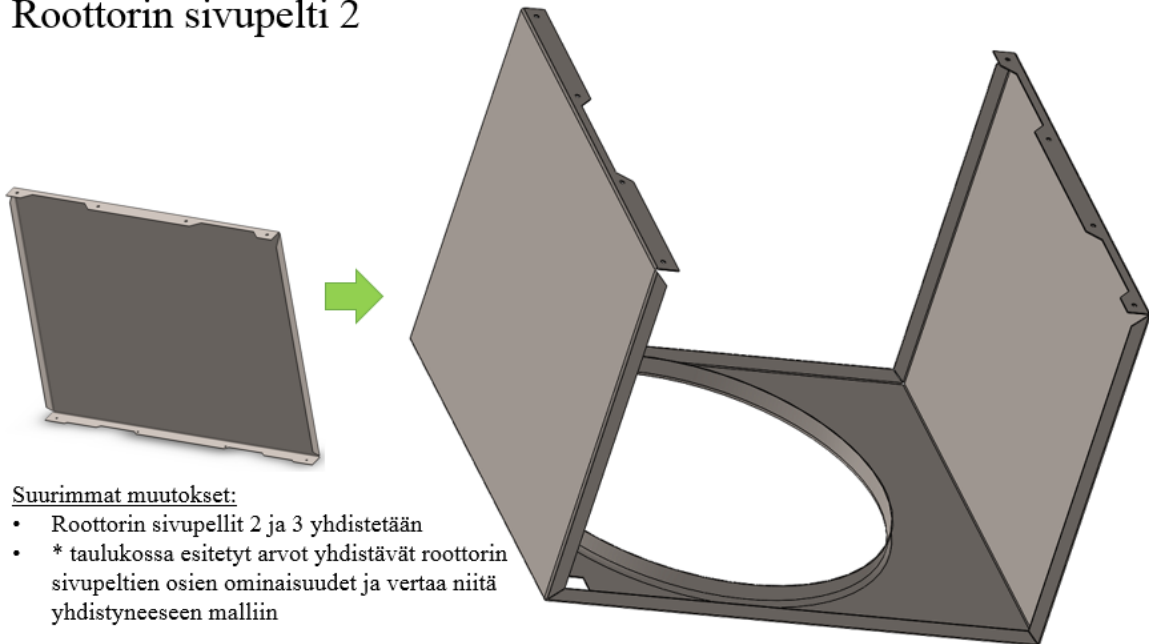
Suurimmat muutokset:

- Osa ei muuttunut uudelleen suunnittelussa

Kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	349.36 gr (349.36)	2 (2)	10 (10)	13 (13)	4 (4)	4 (4)

Roottorin sivupelti 2



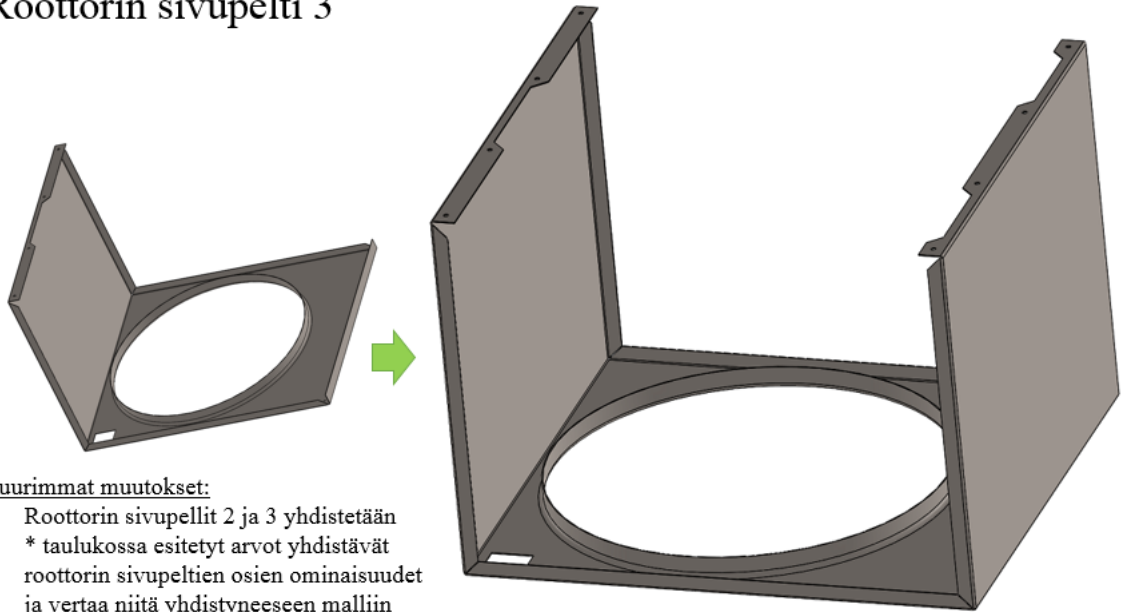
Suurimmat muutokset:

- Roottorin sivupellit 2 ja 3 yhdistetään
- * taulukossa esitetyt arvot yhdistävät roottorin sivupeltien osien ominaisuudet ja vertaa niitä yhdistyneeseen malliin

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (2)	1084.16 gr (*1 123,11)	8 (12)	8 (8)	10 (18)	10 (11)	9

Roottorin sivupelti 3



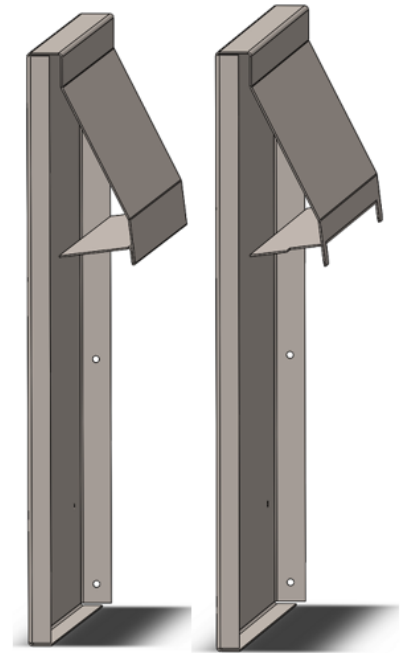
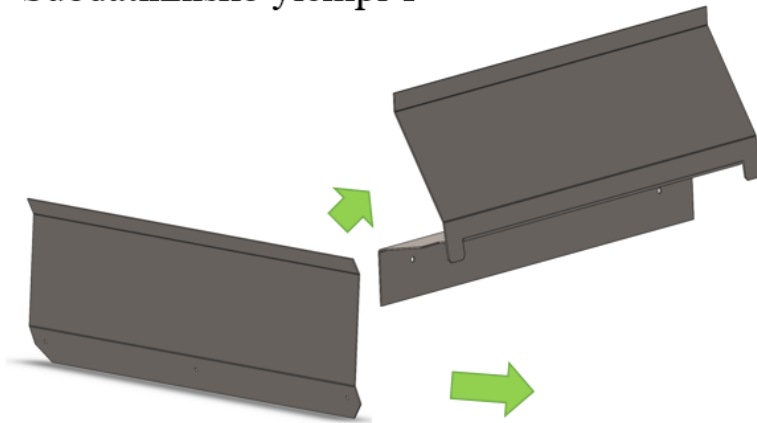
Suurimmat muutokset:

- Roottorin sivupellit 2 ja 3 yhdistetään
- * taulukossa esitetyt arvot yhdistävät roottorin sivupeltien osien ominaisuudet ja vertaa niitä yhdistyneeseen malliin

Kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (2)	1084.16 gr (1 123,11)	8 (12)	8 (8)	10 (18)	10 (11)	9

Suodatinkisko ylempi 1

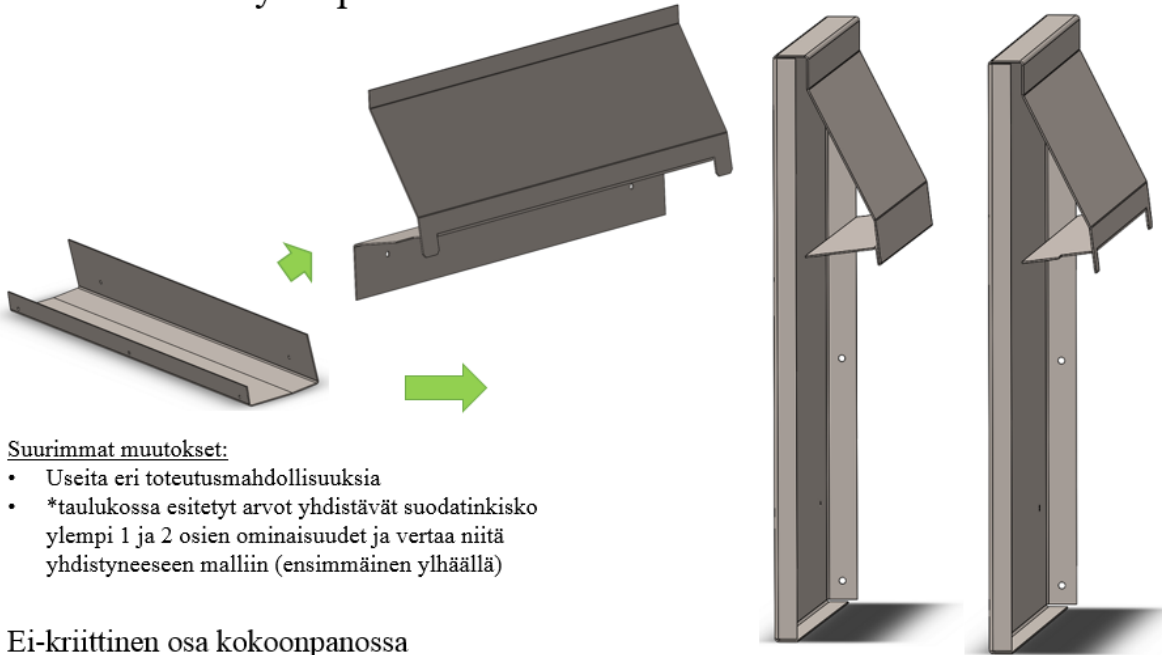
Suurimmat muutokset:

- Useita eri toteutusmahdollisuuksia
- taulukossa esitetyt arvot yhdistävät suodatinkisko ylempi 1 ja 2 osien ominaisuudet ja vertaa niitä yhdistyneeseen malliin (ensimmäinen ylhäällä)

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (2)	254.19 gr (267.71*)	2 (5)	0 (0)	2 (5)	4 (5)	6 (2)

Suodatinkisko ylempi 2

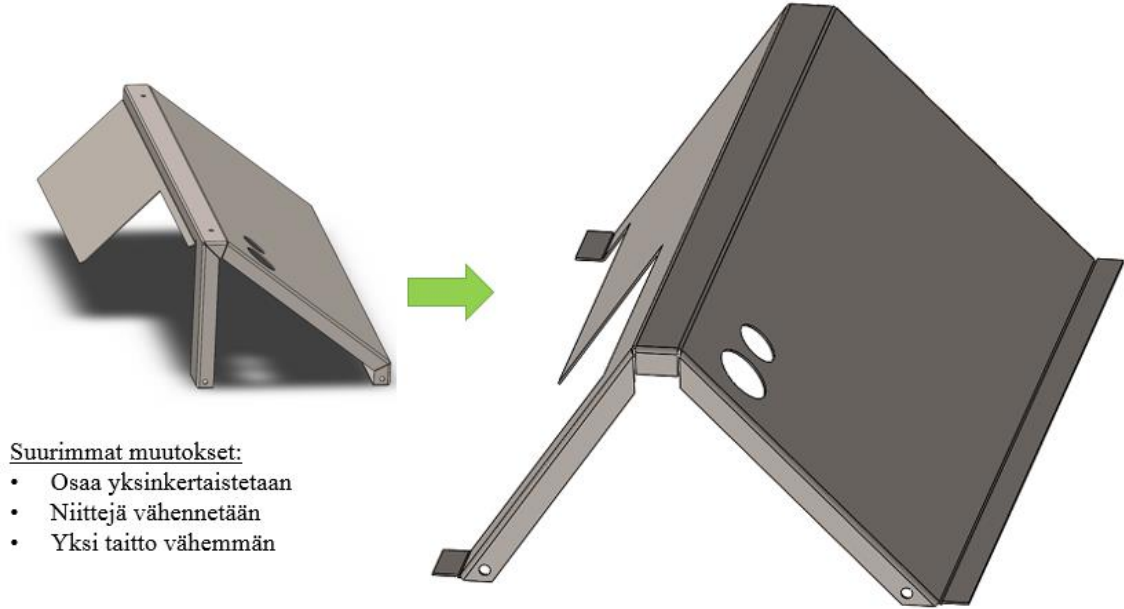
Suurimmat muutokset:

- Useita eri toteutusmahdollisuuksia
- *taulukossa esitetyt arvot yhdistävät suodatinkisko ylempi 1 ja 2 osien ominaisuudet ja vertaa niitä yhdistyneeseen malliin (ensimmäinen ylhäällä)

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (2)	254.19 gr (267.71*)	2 (5)	0 (0)	2 (5)	4 (5)	6 (2)

Väliseinä 2

Suurimmat muutokset:

- Osaa yksinkertaistetaan
- Niittejä vähennetään
- Yksi taitto vähemmän

Kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (1)	382.40 gr (372.37)	5 (8)	0 (0)	7 (10)	11 (12)	8 (11)

Väliseinä 3 sivulista

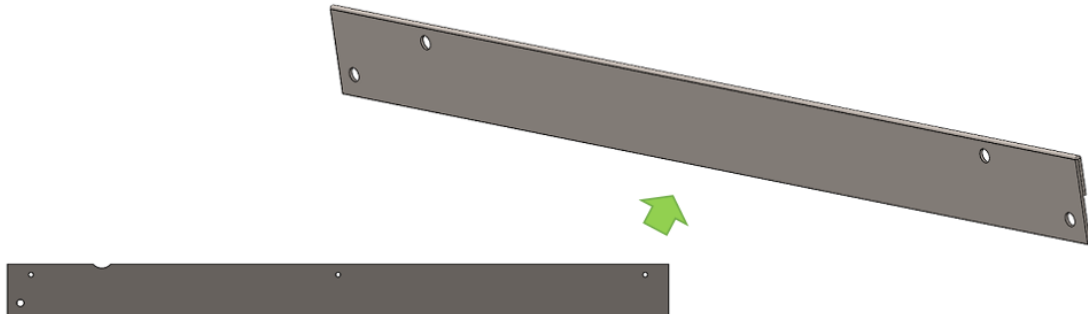
Suurimmat muutokset:

- Osa ei muutu uudelleen suunnittelussa

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1	49.15 gr	3	2	7	1	0

Kennon liu'un listat ulko-osa

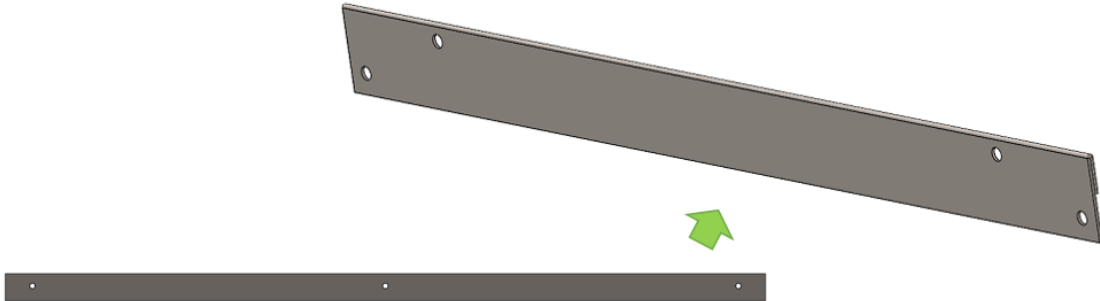
Suurimmat muutokset:

- Osa yhdistetään kennon liu'un listat sisäosa 1 kanssa
- Osa symmetrisoidaan
- Niittejä vähennetään
- Yksi litistystaitto tulee valmistettavaksi
- *taulukossa esitetyt arvot yhdistävät kennon liu'un listat ulko-osan ja sisäosa 1 osien ominaisuudet

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (2)	50.87 gr (38.66*)	2 (3)	1 (1)	7 (8)	1 (0)	0 (0)

Kennon liu'un listat sisäosa 1



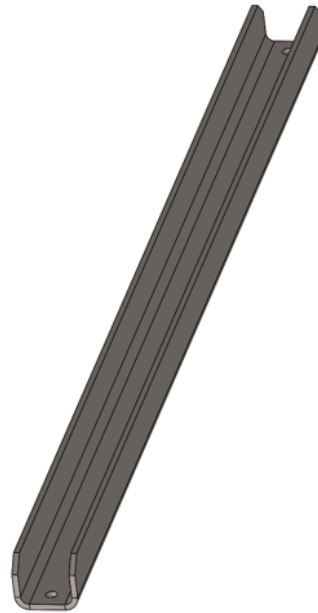
Suurimmat muutokset:

- Osa yhdistetään kennon liu'un listat ulko-osan kanssa
- Osa symmetrisoidaan
- Niittejä vähennetään
- Yksi litistystaitto tulee valmistettavaksi
- *taulukossa esitetyt arvot yhdistävät kennon liu'un listat ulko-osan ja sisäosa 1 osien ominaisuudet

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
0,75	FeZn	1 (2)	50.87 gr (38.66*)	2 (3)	1 (1)	7 (8)	1 (0)	0 (0)

C-kisko

Suurimmat muutokset:

- Osa ei muutu uudelleen suunnittelussa
- Osan kiinnitys muuttuu teippikiinnitykseksi väliseinä 2 kanssa

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,5	FeZn	2	123.21 gr	2	0	2	2	0

Kennon alalista



Suurimmat muutokset:

- Osa ei muutu uudelleen suunnittelussa

Ei-kriittinen osa kokoonpanossa

Levyn paksuus	Materiaali	Määrä	Paino	Niitit	Ruuvit	Reiät	Särmäykset ja taitot	Loveus
1,5	FeZn	1	91.23 gr	0	0	2	2	2