

Julius Jokinen

# TUOTEPERHEEN MODULAARINEN JA PARAMETRINEN KONFIGUROINTI

Kandidaatintyö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Toukokuu 2022

# TIIVISTELMÄ

Julius Jokinen: Tuoteperheen modulaarinen ja parametrisen konfigurointi: Modular and parametric configuration of product family

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Toukokuu 2022

---

Yritysten on kyettävä vastaamaan asiakkaiden kasvavaan vaatimustasoon ja täyttämään tuotteeseen kohdistuvat toiveet. Asiakkaat vaativat yrityksiltä laajempaa tuotevalikoimaa, joka täytyy toteuttaa kuitenkin ilman kustannusten merkittävää nousua. Massatuotannon avulla ei voida täyttää asiakkaiden tuotteeseen kohdistuvia toiveita, joten yritykset ovat ottaneet käyttöön erilaisia massaräätälöinnin tekniikoita. Massaräätälöinti mahdollistaa asiakaskohtaisten tuotteiden valmistuksen, hyödyntäen samalla kuitenkin mittakaavaetua kuten massatuotannossa. Tuoteperheet ja konfigurointi ovat tehokkaita lähestymistapoja tuotteen massaräätelöimiseen. Tuoteperhesuunnittelua ja konfigurointia käyttämällä tuotevariantteja on mahdollista valmistaa suuria määriä alhaisemmilla kustannuksilla ja lyhyemmällä läpimenoajoilla kuin yksittäistuotannon tuotteita. Konfiguroinnin avulla tuote voidaan muodostaa asiakkaiden toiveiden mukaisesti, mikä on keskeinen idea massaräätelöinnissä.

Tämän työn tavoitteena on tutkia konfiguroinnin käyttöä tuoteperheen muodostamisessa ja etenkin selvittää, mitkä tekijät mahdollistavat tuoteperheen konfiguroinnin. Lisäksi tutkitaan, miten tietokoneavusteista suunnittelua hyödynnetään tuoteperheen konfiguroinnissa. Tavoitteena on myös selvittää, mitä hyötyjä tuoteperheiden suunnittelu ja konfigurointi tuo yrityksille. Työ käsittelee fyysisen tuotteen modulaarista ja parametrisä konfigurointia sekä tuoteperheiden ja konfiguroinnin yrityksille tuomia hyötyjä, joten konfiguroituvan tuotteen suunnitteluun ei perehdytä työssä syvällisesti.

Työn alussa käsitellään konfigurointiin ja tuoteperheisiin liittyvää teoriaa, kuten konfiguroinnin mahdollistavia tekijöitä sekä niiden yrityksille tuomia hyötyjä. Tuotteen modulaarinen rakenne on tärkeä ominaisuus, jotta tuote voidaan räätälöidä asiakaskohtaisesti konfiguroinnin avulla. Toinen konfiguroinnin mahdollistava tekijä on erilaiset konfiguraattorit, joiden avulla asiakas voidaan ottaa mukaan tuotteen suunnitteluprosessiin ja selvittää asiakkaiden vaatimukset tuotteelle. Kolmas tekijä on tuotealusta, josta konfiguroidut tuotevariantit muodostavat tuoteperheen. Tuoteperheitä ja tuotealustaa hyödynnetään yrityksissä samankaltaisten tuotteiden suunnittelussa, mikä vähentää toisteisen suunnittelun tarvetta, yksinkertaistaa tuotantoprosesseja ja mahdollistaa tuotteiden yksilöinnin. Myös tietokoneavusteinen suunnittelu on keskeinen apuväline konfiguroinnin toteuttamiseen. CAD-ohjelmien avulla 3D-mallille voidaan luoda parametrisä rakenne. Se mahdollistaa tuotevarianttien konfiguroinnin yhteiseltä tuotealustalta sekä helpottaa ja nopeuttaa tuotevarianttien konfigurointiprosessia.

Työn lopussa on soveltava esimerkki tuoteperheen konfiguroinnista laipalle CAD-ohjelman ja Excelin avulla. 3D-malli yhdistetään ohjelman sisältämän, tuoteperheen ideaa hyödyntävän toiminnon avulla Excelin laskentataulukkoon, johon tuotevariantit parametrisoidaan kuviteltujen asiakasvaatimusten mukaisesti. Konfiguroinnin tuloksena laipasta muodostetaan kolme tuotevarianttia, joista kaikki rakentuvat samalta tuotealustalta. Kun tuotealusta on huolellisesti mallinnettu ja parametrisoitu, varianttien konfigurointi onnistuu nopeammin ja pienemmällä vaivalla verrattuna tuotteiden mallintamiseen yksitellen. Konfiguroinnin ja tuoteperhesuunnittelun avulla esimerkiksi vältetään toisteisen suunnittelun tarvetta, muodostetaan joustavasti variaatiota tuotteeseen ja toteutetaan asiakkaiden erilaiset vaatimukset.

Avainsanat: konfigurointi, massaräätälöinti, tietokoneavusteinen suunnittelu, tuoteperhe, tuotealusta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. KONFIGUROITAVA TUOTE .....	3
2.1 Massaräätälöinti .....	3
2.2 Konfigurointi .....	4
2.3 Konfiguraattori .....	5
2.4 Modulaarisuus .....	6
2.5 Tuoteperhe ja tuotealusta .....	9
2.6 Tuoteperhesuunnittelu .....	10
3. 3D-MALLIN MUODOSTUS .....	14
3.1 Tietokoneavusteinen suunnittelu .....	14
3.2 Siemens NX 12 Part Families .....	16
4. TUOTEPERHEEN KONFIGUROINTI LAIPALLE .....	17
4.1 Laippa .....	17
4.2 Laipan konfigurointi .....	18
4.3 Tulokset ja tulosten analysointi .....	20
5. YHTEENVETO .....	23
LÄHTEET .....	25

# 1. JOHDANTO

Asiakaslähtöisyys on vallitseva suunta markkinoilla, joten yritysten täytyy pystyä luomaan variaatiota tuotteeseen vastatakseen asiakkaiden erilaisiin mieltymyksiin (Fornasiero & Carpanzano 2017). Lisääntynyt kysyntä laajemmalle valikoimalle tuotteita on saanut yritykset kehittämään erilaisia tapoja tuotevarianttien luomiseen (Simpson et al. 2014, s. 1). Tuotteiden asiakaskohtaisuuden lisäksi asiakkaat vaativat korkealaatuisia tuotteita, jotka täytyy pystyä tuottamaan ilman merkittävää hinnan nousemista ja toimitamaan lyhyellä aikataululla säilyttäen korkea palvelutaso (Fornasiero & Carpanzano 2017). Yritysten täytyy siis valmistaa asiakaskohtaisia tuotteita pitäen samalla toimintansa kannattavana (Pakkanen et al. 2016, s. 210).

Jotta yritykset voisivat vastata tuotevariaatioiden kysynnän kasvamiseen ja asiakkaiden tarkempiin vaatimuksiin, ne ovat ottaneet käyttöön erilaisia massaräätälöinnin tekniikoita (Magnusson & Pasche 2014, s. 434). Massaräätälöinnin avulla tuotteesta voidaan valmistaa asiakkaan toiveiden mukainen, kuitenkin samalla saavuttaen massatuotannon edut valmistusprosessissa (Shooter et al. 2005, Piller & Tseng 2009, s. 298 mukaan). Tehokkaita keinoja massaräätälöinnin toteuttamiseen ovat tuoteperheet, tuotealustat, modulaarinen tuoterakenne ja konfigurointi (Pakkanen et al. 2016, s. 210). Modulaarinen tuoteperhe rakentuu erillisten rakennuspalikoiden eli moduulien avulla, joita vaihtelemalla ja muokkaamalla saadaan luotua tuotevariantteja hyödyntäen kuitenkin tuotteiden yhteistä rakennetta eli tuotealustaa (Simpson et al. 2001, s. 2–3, Tseng et al. 2019). Tuoteperhesuunnittelua voidaan käyttää kustannustehokkaan massaräätälöinnin saavuttamiseksi, sillä se mahdollistaa hyvinkin erilaisten tuotteiden kehittämisen yhteiseltä pohjalta (Shooter et al. 2005, Piller & Tseng 2009, s. 298 mukaan).

Modulaarisen tuoteperheen suunnittelu ei itsessään auta tuotevarianttien muodostamisessa, vaan ratkaisu siihen on tuotteen konfigurointi (Pakkanen et al. 2016, s. 212). Konfigurointi on prosessi, jonka päämäärä on tuottaa yksilöllisten vaatimusten perusteella räätälöityjä asiakaskohtaisia tuotteita (Juuti 2008, s. 33). Konfiguroitava tuote ei vaadi myynti-toimitusprosessissa asiakaskohtaista suunnittelua (Juuti 2008, s. 47). Tämä osaltaan mahdollistaa, että tuotevariantteja voidaan valmistaa suuria määriä alhaisemmilla kustannuksilla kuin yksittäistuotannon tuotteita, eli konfiguroinnin avulla voidaan saavuttaa mittakaavaetua kuten massatuotannossa (Juuti 2008, s. 34). Tietokoneavusteinen suunnittelu (CAD, computer-aided design) eli tietokonepohjaisten työkalujen käyttö

suunnittelussa toimii konfiguroinnin tukena, sillä CAD-ohjelman työkalujen avulla konfigurointiprosessi voidaan automatisoida ja suorittaa. Prosessin onnistumisen ja tuotevarianttien muodostamisen kannalta on tärkeää, että 3D-mallilla on parametrinen rakenne. Parametrinen rakenne edellyttää, että mallin mittoja on määritelty parametrien ja yhtälöiden avulla, jolloin parametrien arvoja muuttamalla myös mitat muuttuvat.

Työn tavoitteena on tutkia konfiguroinnin käyttöä tuoteperheen muodostamisessa sekä tietokoneavusteisen suunnittelun hyödyntämistä tuoteperheen konfigurointiprosessissa. Lisäksi tavoitteena on selvittää tuoteperheiden ja niiden konfiguroinnin tuomia hyötyjä yrityksille. Työn tutkimuskysymykset ovat seuraavat: Mitkä tekijät mahdollistavat tuoteperheen konfiguroinnin? Miten tietokoneavusteista suunnittelua käytetään apuna konfiguroinnissa? Mitä hyötyjä tuoteperheiden suunnittelu ja konfigurointi tuo yrityksille?

Konfigurointia käsitellään fyysisen tuotteen suunnittelun ja muodostamisen näkökulmasta. Työ on rajattu käsittelemään itse konfigurointiprosessia ja tuoteperheiden konfiguroinnin tuomia hyötyjä, joten konfiguroitavan tuotteen suunnitteluprosessiin ei perehdytä syvällisesti. Työ keskittyy tuotteen räätälöimiseen modulaarisen ja parametrisen konfiguroinnin avulla. Räätälöinnillä tarkoitetaan tuotteen muokkaamista asiakkaan tarpeiden mukaisesti. Tuotteen pinnan räätälöintiä sekä generatiivista räätälöintiä eli tuotteen muodostamista esimerkiksi asiakkaan määrittämän sivukuvan perusteella ei työssä käsitellä. Teoriaosuuden lähteet on kerätty aiheeseen liittyvistä tutkimuksista ja kirjoista pääsääntöisesti käyttäen Tampereen yliopiston kirjaston Andor-tietokantaa.

Työn toisessa luvussa käsitellään konfiguroitavan tuotteen muodostamiseen ja tuoteperheen suunnitteluun liittyvää teoriaa. Luvussa keskitytään konfiguroinnin ja tuoteperheiden tarkoitukseen ja hyötyihin sekä konfiguroinnin mahdollistaviin tekijöihin, kuten konfiguraattoreihin, modulaarisuuteen, tuotealustaan ja tuoteperhesuunnitteluun. Kolmannessa luvussa tutkitaan tietokoneavusteisen suunnittelun käyttöä konfiguroinnin apuvälineenä ja 3D-mallin rakentumisen automatisoinnissa. Luvussa käydään läpi 3D-mallin parametrisointia ja CAD-ohjelmien kykyä muodostaa automaattisesti parametrisen mallin rakenne, mikä on tuotevarianttien konfiguroinnin kannalta olennaista. Lisäksi selvitetään Siemens NX 12 -suunnitteluohjelman tuoteperhettä hyödyntävän työkalun käyttö-tarkoitus ja perusidea. Neljännessä luvussa havainnollistetaan konfigurointiprosessi ja konfiguroinnin hyödyt konfiguroimalla tuoteperhe laipalle kuviteltujen asiakasvaatimusten mukaisesti CAD-ohjelman ja Excelin avulla. Käytettäväksi ohjelmaksi valikoitui Siemens NX 12, mutta esimerkki on sovellettavissa myös muihin ohjelmiin. Laipan konfiguroinnissa hyödynnetään teoriaosuudessa tarkasteltua tuotteen modulaarista rakennetta, tuotealustaa ja 3D-mallin parametrisointia.

## 2. KONFIGUROITAVA TUOTE

### 2.1 Massaräätälöinti

Massaräätälöinti tähtää asiakkaiden erilaisten mieltymysten täyttämiseen lisäämällä tuotevalikoimaa ja -variaatiota, kuitenkin lisäämättä kustannuksia ja läpimenoaikoja merkittävästi (Tseng et al. 1996, s. 153). Tuotteen massaräätälöinnillä tuotevalikoimaan saadaan luotua vaihtelua, kuitenkin noudattamalla massatuotannon periaatteita tuotteen valmistuksessa. Massaräätälöinnin avulla pyritään siis tuottamaan tuotteita hyödyntäen sekä massatuotannon että yksittäistuotannon etuja samaan aikaan (Juuti 2008, s. 33).

Massatuotannon keskeinen idea on valmistaa saman suunnittelun pohjalta suuria määriä tuotteita, jolloin tuotannon kasvaessa keskimääräiset kustannukset laskevat. Tätä massatuotannon periaatetta kutsutaan mittakaavaeduksi. Mittakaavaedun lisäksi massaräätälöitävien tuotteiden täytyy toteuttaa tuotevarioinnin edut. Siinä ei keskitytä niinkään tuotantomääriin, vaan erilaisten, mutta yhteensopivien tuotteiden valmistukseen. Tämä onnistuu, kun tuotteiden valmistuksessa hyödynnetään esimerkiksi samoja laitteita sekä samaa teknologiaa ja suunnittelua. Tehokkaita lähestymistapoja massaräätälöintiin ovat tuoteperheet ja tuotteen modulaarisuus. Näiden avulla voidaan saavuttaa massatuotannon mittakaavaetu tuottaen silti asiakaskohtaisia tuotteita. (Tseng et al. 2019)

Tuote voidaan räätälöidä asiakkaalle neljällä eri tavalla, jotka ovat tuotteen modulaarinen räätälöinti, parametrinen räätälöinti, pinnan räätälöinti ja generatiivinen räätälöinti (Hermans 2012, s. 210–211). Pinnan räätälöinnissä asiakkaat voivat muokata visuaalisen pintakerroksen tuotteeseen. Generatiivinen räätälöinti mahdollistaa asiakkaalle 2D- ja 3D-mallien luomisen sisäänrakennetun generointimenetelmän perusteella, jolloin asiakas voi määrittää tuotteen muodon. (Hermans 2012, s. 208) Generatiivisessa räätälöinnissä asiakkaat voivat esimerkiksi luonnostella tuotteen sivukuvan ja pursottaa sen 3D-malliksi (Zhao et al. 2019, s. 206). Tuotteen modulaariseen ja parametriseen räätälöintiin perehdytään seuraavassa alaluvussa tarkemmin, sillä niitä hyödyntämällä voidaan konfiguroida monipuolisesti tuotevariantteja modulaariselta tuotealustalta. Pinnan räätälöinti rajoittuu vain tuotteen pintakerroksen valitsemiseen, kun taas generatiivinen räätälöinti ei perustu modulaarisuuteen.

## 2.2 Konfigurointi

Konfigurointi on yksi lähestymistapa massaräätälöintiin massatuotannon ja yksittäisen tuotannon välillä. Konfiguroinnin päämäärä on tuottaa asiakaskohtaisia tuotteita, jotka on räätälöity yksilöllisten vaatimusten perusteella. (Juuti 2008, s. 33) Asiakkaan näkökulmasta konfiguroitavat tuotteet ovat sellaisia, joiden rakenteen ja ominaisuudet asiakkaat voivat määrittää eli konfiguroida tietyistä valikoimasta, jolloin jokainen tuote on yksilöity asiakkaan haluamalla tavalla. Yrityksen näkökulmasta konfiguroitava tuote on osa tuoteperhettä, josta jokainen yksittäinen tuote saadaan muodostettua konfigurointiprosessin kautta. (Jørgensen 2009, s. 4) Tiihosen ja Soinisen (1998) mukaan konfigurointiin ja konfiguroituvan tuotteen ominaisuuksiin kuuluu, että tuote ja sen rakenne on ennalta suunniteltu. Tilaus-toimitusprosessissa ei tarvita enää siis luovaa tai innovatiivista suunnittelua, vaan jokainen tuote voidaan pikemminkin muodostaa rutiininomaisesti. (Tiihonen & Soininen 1998) Konfigurointi on siis ennalta rajattu prosessi, jossa määritetään tuotteen rakenne asiakaskohtaisten vaatimusten perusteella eli räätälöidään tuote vastaamaan asiakkaiden mieltymyksiä.

Simpsonin (2006, s. 6) mukaan kaksi yleisintä tapaa tuotteen tuotealustapohjaiseen konfigurointiin ovat modulaarinen eli mukautuva konfigurointi ja parametrinen eli skaalautuva konfigurointi. Yksinkertaisempi tapa tuotteen konfigurointiin on modulaarinen konfigurointi, jossa asiakas voi valita tuotteeseen haluamansa ennalta määritetyt moduulit (Jørgensen 2009, s. 4). Tuotevariantteja saadaan luotua lisäämällä, korvaamalla tai poistamalla yksi tai useampi moduuli modulaariselta tuotealustalta (Simpson 2006, s. 6). Kehittyneempi konfigurointitapa on parametrinen konfigurointi, jossa asiakas voi konfiguroida tuotteen esimerkiksi valitsemalla arvot tietyille tuotteen ominaisuuksille yhteensulautetussa ohjelmistossa (Jørgensen 2009, s. 4). Parametrisessa konfiguroinnissa yhtä tai useampaa mallin skaalautuvaa parametriä muutetaan asiakkaiden toiveiden tai markkinoiden vaatimusten mukaisesti (Simpson 2006, s. 6). Tuotteen koko siis pienenee tai suurenee skaalautuvien parametrien arvojen mukaan, jolloin asiakas voi muodostaa erikokoisia tuotevariantteja.

Tuotteen konfigurointi tuo yrityksille monenlaisia etuja. Tiihosen ja Soinisen (1998) yrityksille tekemän tutkimuksen perusteella yleisimmät syyt konfiguroitavan tuotteen suunnitteluun ja valmistukseen ovat seuraavat:

- kyky täyttää monenlaisia asiakkaiden vaatimuksia
- lyhyemmät läpimenoajat myynti-toimitusprosessissa
- parempi tuotannon kontrollointi

- asiakaskohtaisen suunnittelun vähentyminen
- laajan tuotevalikoiman tarjoaminen kustannustehokkaasti
- laadun paraneminen.

Juutin (2008, s. 33–34) mukaan asiakkaiden vaatimusten täyttämisen lisäksi konfiguroitavan tuotteen suurimmat hyödyt liittyvät mittakaavaedun saavuttamiseen ja työskentelymenetelmien johdonmukaistamiseen. Konfiguroinnin avulla yritys pyrkii myös pitämään liiketoimintansa kannattavana, sillä konfigurointi on yksi tapa hallita asiakkaiden toiveita ilman asiakaskohtaisen suunnittelun tarvetta. (Juuti 2008, s. 33–34) Tilaus-toimitusprosessissa ei tarvita enää insinöörisuunnittelua, kun tuote on konfiguroitava (Juuti 2008, s. 47). Parempi laatu ja lyhyemmät läpimenoajat ovat seurausta suunnittelun ja tuotteen elementtien uudelleenkäytöstä. Konfiguroitavissa tuotteissa asiakkaiden tarpeet eivät kuitenkaan aina täyty samalla tasolla, mikä onkin niiden suurin epäkohta. (Juuti 2008, s. 34) Joidenkin asiakkaiden toiveet pystytään siis toteuttamaan paremmin kuin toisten.

Tuotteen konfigurointi toimii yhdistävänä tekijänä myynnin ja tuotannon välillä, sillä sen avulla voidaan poistaa erilaiset tavoitteet niiden väliltä. Perinteisesti myyntiosasto haluaa myydä asiakkaan mieltymyksiä vastaavia tuotteita, kun taas tuotannon näkökulmasta tuotannon hallinta ja toteutus on helpompaa, kun valmistetaan standardisoituja tuotteita. (Jørgensen 2009, s. 5) Konfiguroitavan tuotteen tuotannon operaatioiden hallinta on yksinkertaisempaa (Juuti 2008, s. 34), sillä tuoteperheisiin perustuvan konfiguroinnin avulla voidaan hyödyntää tuotteiden yhteisiä piirteitä ja ominaisuuksia niiden valmistuksessa. Lopputuotteeseen otetaan kuitenkin huomioon asiakkaiden toiveet tuotteen modulaarisen rakenteen avulla.

### **2.3 Konfiguraattori**

Konfiguraattori on tietokoneohjelmisto, joka tarjoaa asiakkaalle käyttöliittymän konfiguroinnin suorittamiseen (Jørgensen 2009, s. 5). Konfiguraattorit mahdollistavat massaräätälöityvien tuotteiden valmistuksen. Massaräätälöinnille on ominaista, että asiakkaat ovat mukana suunnitteluprosessissa, mikä voidaan toteuttaa käyttämällä konfiguraattoria. Sen avulla asiakkaat voivat konfiguroida ja muokata massaräätälöityvän tuotteen vastaamaan mieltymyksiään. (Paunu & Mäkipää 2014, s. 130) Konfiguraattorin tarjoama parametrisoinnin taso voi vaihdella yksinkertaisista muutoksista, kuten mittakaavan muuttamisesta, monimutkaisempiin muutoksiin, kuten tuotteen muodon muuttamiseen tai reikien ja geometrian lisäämiseen (Zhao et al. 2019, s. 216). Konfiguraattori voidaan



yhdistää mallinnusohjelmaan tuotteen havainnollistamiseksi asiakkaalle. Monien yritysten nettisivuilla sovelletaan geometrista mallinnusta virtuaalisen 3D-mallin esittämiseen asiakkaalle, joten konfiguraattori mahdollistaa tuotteen muokkaamisen myös internetin välityksellä (Zhao et al. 2019, s. 204). Konfiguraattorin avulla voidaan määritellä kaikki mahdolliset tuotevariaatiot mahdollisimman vähäisillä käyttäjän merkinnöillä (Ptak & Smith 2011, luku 19.8). Asiakkaiden on tällöin helpompi valita haluamansa ominaisuudet tuotteeseen.

Asiakkaat voidaan ottaa mukaan tuotteen suunnitteluprosessiin monella tapaa erilaisten konfiguraattoreiden avulla. Paunun ja Mäkipään (2014, s. 130–131) mukaan myyntikonfiguraattorit tarjoavat helppokäyttöisen käyttöliittymän, jonka avulla asiakkaiden toiveet voidaan huomioida ja tarjota heille sopivia variantteja eli muunnelmia tuotteesta. Tuotekonfiguraattoria käytetään yleensä määrittelemään tuotteeseen valittavat komponentit ja moduulit, jotta asiakas voi luoda validoidun ja räätälöidyn tuotteen. Suunnittelukonfiguraattorit perustuvat moduulien, komponenttien tai koko tuotteen parametriseen konfigurointiin sen sijaan, että asiakas valitsisi tuotteeseen vain valmiiksi suunniteltuja moduuleja tai komponentteja. Näin se tarjoaa asiakkaalle suuremman mahdollisuuden räätälöidä tuotetta. Suunnittelukonfiguraattori tuottaa asiakkaalle 2D-piirustuksia manipuloidulla parametrisia 3D-malleja, kuitenkin mallin sisältämien suunnittelutietojen mukaan. Nämä kolme konfiguraattoria voivat toimia myös yhdessä, jolloin myyntikonfiguraattorilla kerätään asiakkaiden toiveet, tuotekonfiguraattorilla konfiguroidaan tuotteen modulaariset osat ja suunnittelukonfiguraattorilla luodaan CAD-piirustukset tuotteen parametrisistä osista. (Paunu & Mäkipää 2014, s. 130–131)

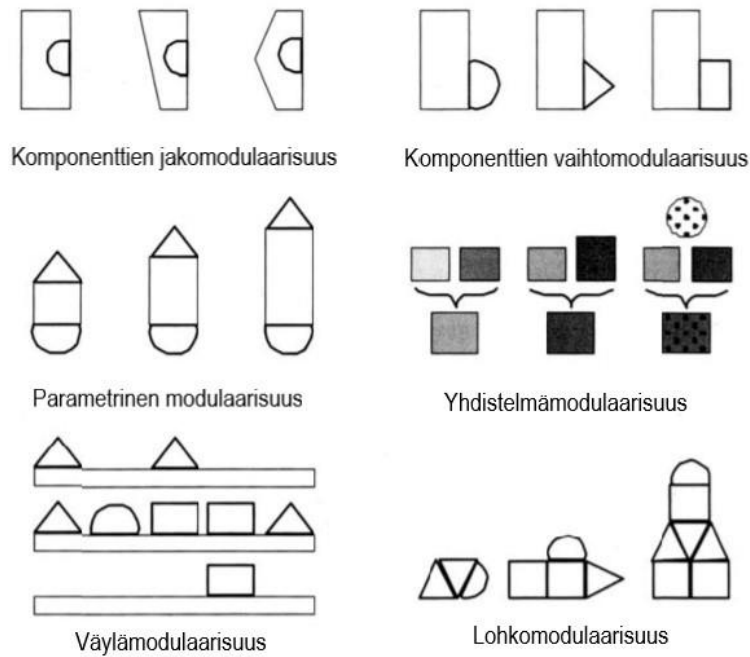
## 2.4 Modulaarisuus

Konfiguroitavalle tuotteelle on ominaista modulaarinen rakenne. Tsengin et al. (2019) mukaan modulaarisuus tarkoittaa, että tuote voidaan muodostaa ryhmittelemällä osakoonpanot ja komponentit erillisiksi rakennuspalikoiksi eli moduuleiksi. Moduulit voidaan yhdistää konfiguroinnin avulla vastaamaan asiakas- ja suunnitteluvaatimuksia. (Tseng et al. 2019) Konfiguroitava tuote muodostuu moduuleista ja moduuli muodostuu toisista moduuleista ja/tai komponenteista (Piller & Tseng 2009, s. 324). Modulaarisuus liittyy oleellisesti myös massaräätälöintiin, sillä se on keino luoda variaatiota tuotevalikoimaan (Juuti 2008, s. 42). Tuotteen modulaarinen rakenne on lähes välttämätön ominaisuus konfiguroitavalle tuotteelle. Myös joitakin parametrisia tuotteita voidaan pitää modulaarisina, vaikka ne eivät varsinaisesti rakentuisi moduuleista. (Tiihonen & Soininen 1998)

Modulaarisen tuotteen rakenteen toteuttaminen vaatii tuotteen jaottelua osittain tai täysin itsenäisiin osiin, jolloin moduulit on mahdollista suunnitella ja valmistaa erillisinä toisistaan (Agard & Kusiak 2004, s. 2957). Edellytyksenä tuotteen modulaariselle rakenteelle on, että asiakkaiden vaatimukset eivät poikkea toisistaan liikaa (Juuti 2008, s. 34). Modulaarisuuden toteuttaminen on hankalaa tilanteissa, joissa yksittäisten moduulien pitäisi kyetä täyttämään useita erilaisia asiakastarpeita (Pakkanen et al. 2016, s. 228).

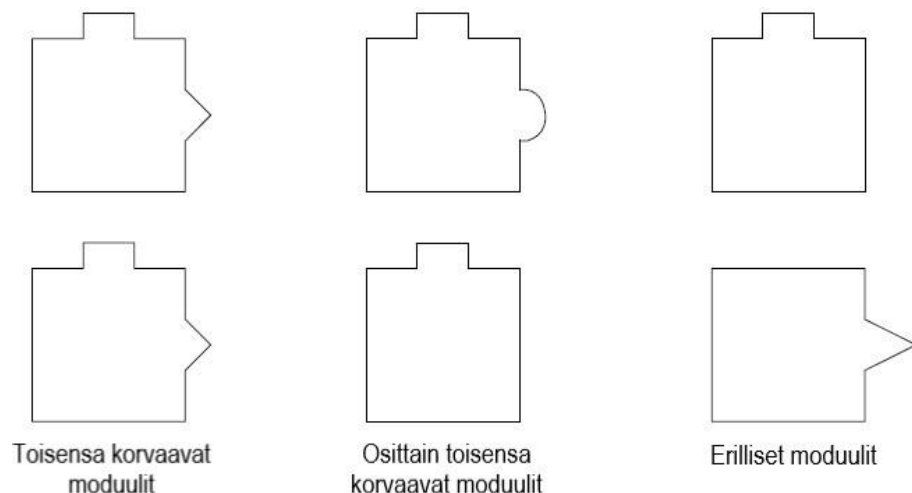
Modulaarinen tuoterakenne lisää tuotteen muokattavuutta ja pienentää suunnittelun aiheuttamia kustannuksia. Tuotteen jakaminen moduuleihin mahdollistaa tiettyjen moduulien muokkaamisen ilman, että tuotealustaa eli tuotteiden yhteistä rakennetta tarvitsee muokata. Tällöin monimutkaiset ongelmat voidaan jakaa useiksi pienemmiksi ongelmiksi. Suunnittelija voi muokata yksittäistä moduulia suunnittelematta koko tuotetta uudelleen. Tuotteeseen saadaan myös lisättyä uusia ominaisuuksia kehittämällä uusi moduuli. (Tseng et al. 2019) Tuotteen toiminnallisuuteen pystytään vaikuttamaan vaihtamalla tuotteen itsenäisiä moduuleja, jolloin voidaan toteuttaa erilaisia asiakkaiden vaatimuksia. Modulaarisuus mahdollistaa myös tuotteen standardoinnin, joka on edellytyksenä mittakaavaedun saavuttamiseksi. (Jiao et al. 2007, s. 12)

Modulaarisuus voidaan jakaa kuuteen kategoriaan sen mukaan, millä tavoin vaihtelevuutta voidaan luoda tuotteeseen ja konfiguroida lopullisen tuotteen rakenne (kuva 1). Pakkanen (2015, s. 54) kuvailee modulaarisuustyyppien ominaisuudet seuraavasti: Komponenttien jakomodulaarisuudessa useassa erilaisessa tuotteessa käytetään samaa komponenttia. Komponenttien vaihtomodulaarisuudessa eri komponentit yhdistetään samaan perustuotteeseen. Tällöin saadaan luotua variantteja saman tuoteperheen sisällä (Juuti 2008, s. 41). Parametrisessä modulaarisuudessa jotain tuotteen moduulia voidaan skaalata ennalta määritettyjen rajojen sisällä. Yhdistelmämodulaarisuudessa moduuleja yhdistämällä saadaan aikaan uusi moduuli. Väylämodulaarisuudessa standardirakenteeseen voidaan liittää useita eri moduuleja eri paikkoihin rakennetta. Lohkomodulaarisuudessa komponenteilla on vakiorajapinnat, jolloin niitä voidaan yhdistää mielivaltaisilla tavoilla. Varioituvuus ja räätälöintimahdollisuus on siis suurin ja tuote voidaan konfiguroida uudelleen, mutta lohkomodulaarisen rakenteen suunnittelu on vaikein toteuttaa. (Pakkanen 2015, s. 54)



**Kuva 1.** Modulaarisuuden kategoriat (muokattu lähteestä Pine 1993, Pakkanen 2015, s. 55 mukaan).

Moduulit ryhmitellään usein myös sen perusteella, kuinka ne voidaan liittää toisiin moduuleihin. Toisensa korvaavilla moduuleilla on samanlainen liitântä, joten ne voivat korvata toisensa tuotteessa. (Jørgensen 2009, s. 9) Osittain toisensa korvaavat moduulit ovat muuten samanlaiset, mutta toisessa moduulissa on jokin lisäominaisuus. Erilliset moduulit eivät voi korvata toisiaan eli ne ovat riippumattomia toisistaan. Kuva 2 havainnollistaa kahden moduulin liitântää tuotealustaan sen perusteella, miten ne vaikuttavat toisiinsa.

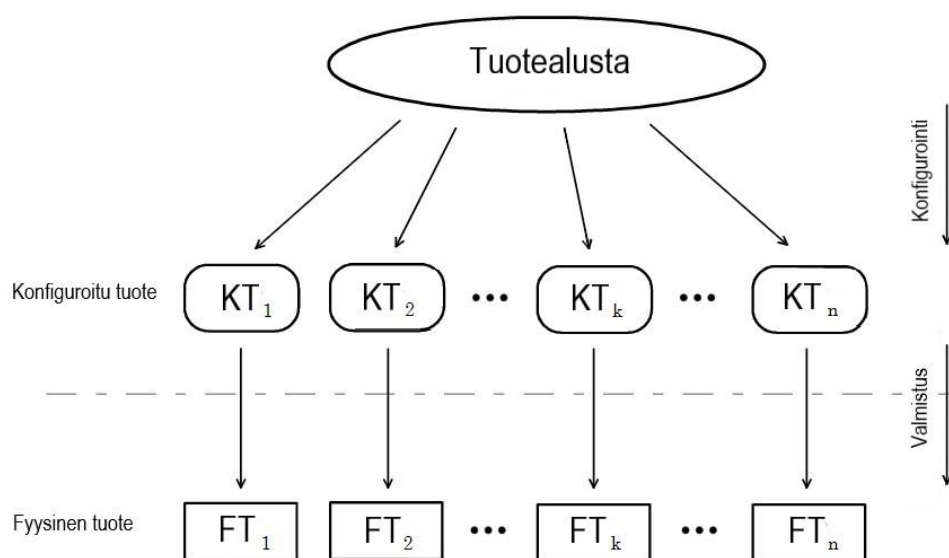


**Kuva 2.** Kaksi moduulia voi vaikuttaa toisiinsa kolmella eri tavalla (muokattu lähteestä Jørgensen 2009, s. 9).

## 2.5 Tuoteperhe ja tuotealusta

Simpsonin et al. mukaan (2001, s. 2–3) tuoteperhe on joukko samankaltaisia tuotteita, jotka on muodostettu yhteiseltä pohjalta tyydyttämään erilaisia asiakastarpeita. Tuoteperhe rakentuu muuttujista, ominaisuuksista ja/tai komponenteista, jotka ovat samat joka tuotteessa. Tätä kaikille tuotteille yhteistä rakennetta kutsutaan tuotealustaksi. Tuoteperhe sisältää myös muuttujia, ominaisuuksia ja/tai komponentteja, jotka vaihtelevat tuotteiden välillä. (Simpson et al. 2001, s. 2–3) Pakkanen (2015, s. 71) määrittelee tuoteperheen muodostuvan samalta tuotealustalta muodostetuista tuotevarianteista. Tuotealusta sisältää uudelleenkäytettäviä ominaisuuksia, joita voidaan käyttää tuotevarianttien luomiseen tiettyihin tarpeisiin. (Pakkanen 2015, s. 71)

Tuotealusta toimii perustana uusien moduulien kehittämiseksi ja tuotevarianttien konfiguroinnille tuoteperheen yhteisistä moduuleista (Piller & Tseng 2009, s. 323, Tseng et al. 2019). Tämä mahdollistaa suurien tuotemäärien räätälöimisen, jolloin voidaan saavuttaa taloudellista mittakaavaetua, kuten massatuotannossa (Tseng et al. 2019). Tuotealustalta tuotevarianttien muodostamisen kustannustehokkuus perustuu siihen, että tuotevariantista riippumatta tuotealusta säilyy samana, kun taas tuotteen muuttuvat osat luovat vaihtelua tuotteeseen (Baldwin & Woodard 2009, Magnusson & Pasche 2014, s. 436–437 mukaan). Modulaarisuus ja moduulit ovat usein keino variaation luomiseen edellyttäen kuitenkin, että tuotealustan ja moduulien rajapinnat on määritelty tarkasti (Magnusson & Pasche 2014, s. 437). Kuvassa 3 on esitetty tuoteperheen rakentuminen yhteiseltä tuotealustalta konfiguroinnin avulla. Tuoteperheen jokaisen konfiguroidun tuotteen rakenne perustuu tuotealustaan.



**Kuva 3.** Tuoteperheen tuotealusta toimii tuotevarianttien konfiguroinnin perustana (muokattu lähteestä Piller & Tseng 2009, s. 324).

Tuotealustalle on määritettävä tarkat rajoitukset, miten siitä voidaan konfiguroida yksittäinen tuote (Jørgensen 2009, s. 4). Alusta kuvaa, mitkä moduulit ovat osa tuoteperhettä, ja miten moduuleita on mahdollista yhdistellä. Tuotealusta sisältää siis tiedon, miten alustasta voidaan johtaa erilaisia tuotevariantteja lisäämällä, poistamalla, korvaamalla tai muokkaamalla tuotteen moduuleja. Kun tuotealustan sisältämät tiedot yhdistetään konfiguraattoriin, asiakkaat voivat valita haluamansa moduulit lopputuotteeseen tai syöttää haluamansa ominaisuudet, jolloin konfiguraattori valitsee tai muodostaa sopivat moduulit. (Jørgensen 2009, s. 3)

## 2.6 Tuoteperhesuunnittelu

Tuoteperheen muodostamiseen on kaksi lähestymistapaa. Ensimmäinen tapa on top-down-suunnittelu, jossa yritys kehittää tuoteperheen muodostamalla tuotevariantteja yhteiseltä tuotealustalta. Toinen on bottom-up-suunnittelu, jossa yritys suunnittelee uudestaan tai yhdistää erillisiä tuotteita tuoteperheiksi standardoidakseen niiden komponentteja taloudellisen mittakaavaedun saavuttamiseksi. Molemmissa tapauksissa tuoteperheen muodostaminen perustuu modulaariseen ja/tai parametriseen suunnitteluun, joissa hyödynnetään tuotealustaa. (Simpson 2006, s. 5–6)

Kun konfigurointia tarkastellaan tuotealustaan perustuvan tuoteperhesuunnittelun näkökulmasta, voidaan modulaarisesta ja parametrisestä konfiguroinnista käyttää nimitystä modulaarinen ja parametrinen suunnittelu. Parametristä suunnittelua pidetään joskus osana modulaarista suunnittelua (Simpson 2006, s. 8), sillä parametrisessä suunnittelussa hyödynnetään tuotteen parametrissa modulaarisuutta.

Parametrisen tuoteperheen tuotealusta muodostuu yhteisistä ja skaalautuvista suunnittelumuuttujista. Yhteisten muuttujien arvot pysyvät vakiona tuotteelta toiselle tuoteperheen sisällä, kun taas skaalautuvien muuttujien arvot vaihtelevat tuotteiden välillä. Skaalautuvia muuttujia käytetään muuttamaan tuotteen kokoa käyttötarkoituksen mukaan. (Simpson et al. 2001, s. 3) Skaalautuvat muuttujat voidaan jakaa edelleen parametrisiin ja konfiguroituihin muuttujiin. Parametriset muuttujat vaikuttavat suoraan tuotteen suorituskykyyn, kun taas konfiguroituvien muuttujien avulla valitaan komponentin tyyppi tai muuttujan lukumäärä. (Simpson et al. 2001, s. 5) Parametrinen tuoteperhesuunnittelu voidaan jakaa karkeasti kahteen vaiheeseen. Ensin täytyy valita tuoteperheen tuotealusta eli parametrit, jotka ovat kaikille tuotteille samat. Toinen vaihe on valita optimaaliset arvot tuotteiden välillä vaihtuville muuttujille suorituskyvyn ja taloudellisten vaatimusten perusteella. (Jiao et al. 2007, s. 11)

Modulaarinen tuoteperhesuunnittelu perustuu tuotteen jakamiseen moduuleihin (Tseng et al. 2019). Sen tavoitteena on kehittää modulaarinen tuotealusta, josta voidaan muodostaa tuotevariantteja moduulien avulla (Jiao et al. 2007, s. 11). Keskeisiä vaiheita sekä myös haasteita modulaarisessa suunnittelussa ovat moduulien määrittäminen ja niiden liittämisen standardointi sekä modulaarisen rakenteen muodostaminen (Jiao et al. 2007, s. 12). Tuotteen rakenne ja moduulien liitännät pyritään suunnittelemaan siten, että jokaista moduulia on mahdollista muuttaa riippumatta muista moduuleista (Tseng et al. 2019).

Tuotealusta, moduulit ja niiden yhtymäpinnat muodostavat yksittäisen tuotteen rakenteen. Tuoteperhesuunnittelun tavoitteena on suunnitella rakenne mahdollisimman samanlaiseksi eri tuotteiden välillä. (Lehnerd & Meyer 2014, s. 37–38) Onnistuneessa tuoteperheessä tuotteiden yhteiset ja erottuvat ominaisuudet ovat tasapainossa (Simpson 2006, s. 5). Tuotealustan yhteisten ominaisuuksien ja yksittäisten tuotteiden suorituskyvyn täytyy siis olla sopivassa suhteessa tuoteperheen sisällä (Simpson et al. 2001, s. 15). Yksittäisen tuotteen rakenteesta voi tulla uusi tuotealusta, jos sitä aletaan käyttämään perustana useiden muiden tuotteiden muodostamiseen (Lehnerd & Meyer 2014, s. 37–38).

Tuoteperheiden suunnittelussa ja tuotealustojen kehittämisessä ensisijaisen tärkeää on vuorovaikutus asiakkaiden ja markkinoiden kanssa. Yritykset ovat pyrkineet laajentamaan tuotevalikoimaansa asiakkaiden mielenkiinnon herättämiseksi ja myynnin lisäämiseksi. (Simpson 2006, s. 11) Tuoteperhesuunnittelulla saadaan luotua etua, kun asiakkaat asetetaan keskiöön tuotteen arvonaluonnissa ottamalla heidät mukaan valmistusprosessiin. Olennaista on tunnistaa tuotteen ominaisuudet, jotka tuovat asiakkaille arvoa ja rajata heille sopiva valinnanvara räätälöidä tuotetta. (Jiao et al. 2007, s. 20)

Asiakkaiden vaatimusten vaihtelun ja tuotteen ajallisen kehityksen mukaan tuote kantaa suunnitella seuraavasti:

- Jos asiakkaiden vaatimukset eivät poikkea paljon toisistaan, suunnitellaan standardisoitu tuote.
- Jos asiakkaiden vaatimusten vaihtelu johtuu heidän eriävistä mieltymyksistään, suunnitellaan tuoteperhe, jonka variaatiot täyttävät asiakkaiden vaatimukset.
- Jos tiedetään, että asiakkaiden vaatimukset tulevat muuttumaan ajan kuluessa, eristetään kehittyvät ominaisuudet ja suunnitellaan moduuli niitä varten. Moduuli suunnitellaan aina uudestaan vastaamaan asiakkaiden ajan myötä muuttuvia mieltymyksiä. (Agard & Kusiak 2004, s. 2958)

Tuoteperheiden hyötyjä ovat tuotteiden muokattavuus, tehokkuus tuotesuunnittelussa ja tiedonhallinnassa sekä positiivinen vaikutus markkina-asemaan (Simpson 2006, s. 33). Tuoteperhesuunnittelu mahdollistaa hyvinkin erilaisten tuotteiden kehittämisen yhteiseltä pohjalta, jolloin tuotteet voidaan kohdistaa eri markkinasegmenteille (Shooter et al. 2005, Piller & Tseng 2009 mukaan, s. 298). Tuoteperhesuunnittelu vähentää valmistuskustannuksia, sillä tuotealustan kustannukset ovat pääosin uponneita kustannuksia. Lisäkustannukset aiheutuvat variaation luomisesta tuotteeseen. (Lehnerd & Meyer 2014, s. 38–39) Tuotteita voidaan valmistaa siten myös pienemmille markkinoille, sillä tuotevarianttien kehityksestä syntyvät kustannukset ovat pienet suhteessa tuotealustan kehityksen kustannuksiin. Lisäksi, jos asiakas on aiemmin ostanut tuoteperheen tuotteen ja ollut siihen tyytyväinen, on todennäköistä, että hän saattaa ostaa myös toisen tuotteen samasta tuoteperheestä. Tutut ominaisuudet ja piirteet houkuttelevat ostamaan myös muita saman tuoteperheen tuotteita. (Lehnerd & Meyer 2014, s. 35–36)

Yrityksen näkökulmasta on järkevää suunnitella tuotteita, joissa on samoja piirteitä, komponentteja tai osakokoonpanoja, sillä se vähentää valmistuskustannuksia. Uusien resurssien tarve vähenee ja vanhoja resursseja pystytään jakamaan eri tuotteiden kesken. (Simpson 2006, s. 14) Tuoteperheiden valmistuksessa ja suunnittelussa pyritään siis hyödyntämään tuotteita yhdistäviä tekijöitä. Näin saavutetaan massatuotannon edut eli suuremmat tuotantomäärät ja alhaisempi hinta kuin yksilöidyillä tuotteilla. (Lehnerd & Meyer 2014, s. 38–39) Varastotilan tarve vähenee, kun tuotteisiin tarvittavien erilaisten osien ja komponenttien määrä vähenee. Tuotteiden valmistus yksinkertaistuu ja nopeutuu, kun pystytään hyödyntämään samaa tuotantolinjaa. Valmistuksen tehostuminen johtaa lyhyempiin läpimenoaikoihin ja pienempiin valmiiden tuotteiden varastoihin. (Lehnerd & Meyer 2014, s. 35–36)

Tuoteperheen suunnittelu on monimutkainen ja haastava prosessi. Siinä on otettava huomioon asiakkaiden tarpeet ja tekniset vaatimukset, mutta myös esimerkiksi tuotteen valmistukseen liittyvät asiat, kuten tuotantoprosessi (Simpson 2006, s. 14). Haasteena on myös, että tuotealusta ei ole suunniteltu linjassa tuotestrategian kanssa, jolloin tuloksena on ominaisuuksia, jotka eivät tyydytä asiakastarpeita. Tällöin syntyy hukkainvestointeja. (Simpson 2006, s. 19) Tuoteperheen suunnittelussa on otettava huomioon, että asiakkaiden toiveet muuttuvat ajan myötä. Päätökset uuden tuoteperheen perustamisesta ja uuden tuotealustan kehittämisestä on tehtävä siis oikeaan aikaan. (Simpson 2006, s. 42)

Tuotealustan kehittäminen vaatii usein enemmän investointeja ja aikaa kuin yksittäisen tuotteen kehittäminen. Tämä viivästyttää tuotteen saamista markkinoille ja vaikuttaa sijoitetun pääoman tuottoaikaan, minkä takia tuotealustapohjainen tuoteperhesuunnittelu

ei sovi kaikille tuotteille ja markkinaolosuhteille. Jos alusta ei ole kilpailukykyinen, koko tuoteperheen kilpailukyky heikkenee. (Simpson 2006, s. 32) Riskit ovat siis suuremmat kuin yhdelle tuotteelle, sillä suunnittelun epäonnistumiset koskevat usein laajaa joukkoa tuotteita.



## 3. 3D-MALLIN MUODOSTUS

### 3.1 Tietokoneavusteinen suunnittelu

Tietokoneavusteinen suunnittelu (CAD) on tietokonepohjaisten työkalujen käyttöä suunnittelun apuna. Se on tärkein apuväline tuotteen geometrian suunnittelussa ja luomisessa. (Lutters 2019) CAD-järjestelmissä käytetään mallin rakenteen määrittämisessä yhdistettynä sekä 2D-mitoitusta että parametrien avulla mitoitusta. Parametrisointi tarkoittaa 2D-mittojen ja toimintaparametrien nimeämistä, jolloin käyttäjä voi muuttaa niitä joko suoraan tai epäsuorasti. (Stroud & Nagy 2011, s. 525)

3D-mallinnusohjelmissa parametriset mallinnustekniikat perustuvat geometrysten objektien liittämiseen toisiinsa mittatietojen ja geometrysten rajoitusten avulla. Ominaista parametrisen 3D-mallin muodostamiselle on geometriaelementtien ja niitä vastaavien parametrien lajittelu mallin rakenteessa. Parametrien arvoihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi syöttämällä arvot suoraan tai yhtälöiden avulla, jolloin ohjelma muodostaa geometrian uudelleen. Mallin on oltava yhtenäinen, jotta parametrien uudelleenlaskenta on mahdollista. Yhtenäinen parametrisen malli on osittain rajoitettu mittatietojen avulla ja jäljelle jäävä osuus geometrysten elementtien välisten suhteiden avulla. Parametrien ja geometrysten elementtien väliset suhteet muodostavat parent-child-suhteita, mikä johtaa mallin täydelliseen parametrisointiin. (Hirz et al. 2013, s. 247)

CAD-järjestelmissä mittojen välille voidaan luoda riippuvuuksia. Monissa järjestelmissä mittojen arvot voidaan laskea suoraan muiden mittojen arvoista, mikä on erittäin tärkeää tuoteperehden konfiguroinnin kannalta (Stroud & Nagy 2011, s. 525). CAD-mallin parametrit voidaan jakaa ohjaaviin ja ohjattaviin parametreihin. Ohjattavat parametrit mukautuvat käyttäjän asettaman, ohjaavaa pääparametria muuttavan syötteen mukaan automaattisesti. (Kloock-Schreiber et al. 2019, s. 26) Tällöin on mahdollista esimerkiksi muuttaa mallin kokoa muuttamalla vain yhden parametrin arvoa tai muuttaa koko tuotteen kokoa muuttamalla yhden sen komponentin kokoa. Parametrista suunnittelua voidaan hyödyntää siis sekä osatasolla että kokoonpanotasolla, kun mallin muu geometria on sidottu keskeisen geometrian parametreihin (Hirz et al. 2013, s. 248).

Nykyisin CAD-järjestelmissä on mahdollista tehdä 3D-malleja, joihin pystytään sisällyttämään mallin rakentumisen kannalta olennaista tietoa. Tällaiset itsegeneroituvat mallit ovat rutiininomaisen suunnittelun automatisoinnin kannalta erittäin hyödyllisiä, sillä niillä on kyky itseorganisoitua. Itseorganisoitumisella tarkoitetaan mallin sisältämää tietoa, mi-

ten muodostaa automaattisesti uusi rakenne. (Grabowik et al. 2015, s. 1) Itsegeneroituvat mallit sisältävät suunnittelun rakenteellista tietoa erilaisissa muodoissa. Tiedon pohjana voivat olla esimerkiksi

- parametrit, jotka määritellään numeerisilla tai kirjaimellisilla arvoilla
- kaavat, jotka käyttävät aiemmin määriteltyjä parametreja
- päättelysäännöt, jotka muodostuvat yleensä If – Then -rakenteella
- suunnittelutaulukot, jotka mahdollistavat parametrijoukkojen hallinnan. (Grabowik et al. 2015, s. 3)

Itsegeneroituva malli edellyttää, että se on täysin parametrisoitu parametrien ja geometristen suhteiden avulla (Grabowik et al. 2015, s. 5). Jos 3D-malli on parametrisoitu oikein, uusien tuotevarianttien konfigurointi onnistuu helposti muuttamalla tiettyjen parametrien arvoja (Bodein et al. 2014, s. 136). Mallin täytyy olla täysin parametrisoitu ja parametrien välisten suhteiden määriteltyinä, jolloin tuotteen muotoa voidaan muuttaa muokkaamalla parametrien arvoja. Kun mallin mitat on määritelty suhteessa keskeisiin parametreihin, parametrien arvojen muuttaminen saa aikaan näiden mittojen uudelleenlaskennan CAD-ohjelman toimesta. Suhteiden määrittäminen onnistuu esimerkiksi ohjelman sisäisillä työkaluilla tai Excelin laskentataulukon avulla. (Grabowik et al. 2015, s. 4) Mallin rakentamisen kannalta olennaiset parametrit kannattaa nimetä kuvaavilla nimillä. Kun mallia myöhemmin muokataan tai päivitetään, on paljon helpompaa alkaa muuttamaan oikeita mittoja. (Walsh 2006, luku 6.1.4)

Täysin parametrisoitu, itsegeneroituva malli mahdollistaa konfiguroinnin onnistumisen. Zhaon et al. (2019, s. 7) mukaan mallin parametrisointi mahdollistaa myös mallin täyden kolmiulotteisen massaräätälöinnin. Suunnittelija voi määrittää mallia tehdessään, minkä parametrien arvoihin asiakkaat pystyvät vaikuttamaan. (Zhao et al. 2019, s. 7) Itsegeneroituvien mallien avulla voidaan testata erilaisia suunnitteluvaihtoehtoja, mikä parantaa tuotteen 3D-mallin rakenteen suunnitteluprosessia. Ne mahdollistavat myös mallin rakenteen suunnittelutiedon integroimisen yhteen malliin. Sen ansiosta rutiininomaisia suunnittelutehtäviä voidaan automatisoida eikä suunnittelijan tarvitse suorittaa niitä. (Grabowik et al. 2015, s. 6) CAD-mallit ovat myös tärkeässä roolissa tuotekehitysprosessissa, sillä virtuaalisten tuotemallien parametrinen rakenne mahdollistaa mallin joustavan kehittämisen ja muokkaamisen (Hirz et al. 2013, s. 254).

### 3.2 Siemens NX 12 Part Families

Siemens NX 12 -suunnitteluohjelmassa on viisi tapaa muodostaa itsegeneroituvia malleja, joista yksi on Part Families. Part Families -työkalu nopeuttaa tuotteen rakenteen suunnittelua ja muodostamista huomattavasti, sillä se auttaa luomaan suunnitteluvaihtoehtoja sekä tuotevariantteja. (Grabowik et al. 2015, s. 1)

Part Families -työkalua käytetään luomaan tuoteperhe samankaltaisille osille. Työkalun perusidea on, että ensin luodaan 3D-malli, josta muut osat tai tuotteet tulevat rakentumaan. Seuraavaksi luodaan laskentataulukko, jota käytetään kuvaamaan kaikki tuoteperheen jäsenet. Jokainen perheenjäsen perustuu malliosaan sekä laskentataulukkoon, jonka avulla määritetään perheenjäsenten muuttuvat parametrit. Part Families -työkalun yleisin käyttötarkoitus on luoda vakio-osien kirjasto. (Siemens 2017a)

Part Families -työkalu mahdollistaa itsegeneroituvien mallien muodostamisen hyödyntämällä tuoteperheen ideaa. Koska tuoteperhe muodostuu saman suunnittelun perustalta, saman tuoteperheen jäsenet voivat erota toisistaan vain tiettyjen mittojen arvoissa. Työkalu edellyttää, että ensin on mallinnettu tuotealusta eli kiinteä malli, josta perheen voi muodostaa. Tapauksesta riippuen työkalun avulla muodostetut 3D-mallit voivat toimia joko itsenäisinä osina tai osana kokoonpanoa. Part Familiesin avulla malli voidaan liittää Excelin laskentataulukkoon, jota käytetään tallentamaan ja muuttamaan ominaisuuksien arvoja. (Grabowik et al. 2015, s. 5)

Tuoteperheen muodostaminen Siemens NX 12 Part Families -työkalulla voidaan jakaa viiteen päävaiheeseen. Ensin luodaan täysin parametrisoitu osa, jota käytetään tuoteperheen muodostamiseen. Sen jälkeen valitaan halutussa järjestyksessä kappaleen muutettavat parametrit ja piirteet, joista laskentataulukko luodaan Exceliin. Seuraavaksi laskentataulukkoon lisätään uudet osat syöttämällä parametrien arvot ja valitsemalla halutut piirteet. Lopuksi osat luodaan käyttämällä *Create Parts* -komentoa ja lisätään ne tarvittaessa kokoonpanoon. (Siemens 2017b)

## 4. TUOTEPERHEEN KONFIGUROINTI LAIPALLE

### 4.1 Laippa

Parisher ja Rhea (2012, s. 56) määrittelevät, että laippa on renkaan muotoinen putkiston komponentti, jota käytetään liittämään erilaisia putkiston osia yhteen. Laippojen avulla liitetään esimerkiksi putkia putkistokomponentteihin, venttiileihin sekä prosessilaitteistoihin. Laippaliitos on hyvä vaihtoehto hitsaukselle. Laipat kiinnitetään toisiinsa ruuviliitoksien avulla, joten laippaliitos voidaan helposti koota, mutta myös purkaa tarkastusta, huoltoa tai vaihtoa varten. (Parisher & Rhea, 2012, s. 56)

Laippoja on monia erityyppisiä, kuten kaulustettuja laippoja sekä kierre- ja levylaippoja. Laipan keskellä on reikä, johon putki liitetään yleensä hitsaamalla (Smith 2005, s. 197). Putkia on erikokoisia, joten putkelle tarkoitetun reiän halkaisijan täytyy muuttua putken halkaisijan mukaan ja laipoissa täytyy olla eri määrä kiinnitysreikiä. Joissakin laipoissa on lisäksi myös kiertteet, joiden avulla putki ja laippa voidaan liittää yhteen. Smithin (2005, s. 172) mukaan laippatyypin valintaan vaikuttaa monta tekijää, kuten

- putkistossa kulkeva neste
- lämpötilan vaihtelut
- paine
- koko
- putkiston suunniteltu kestoikä
- värähtelyt
- ulkoinen rasitus.

Lukuisat standardit kattavat putkiston osien mitoituksen (Smith 2005, s. 134), mutta tämän esimerkin havainnollistamiseksi standardien mukaisia mitoituksia on noudatettu soveltuvien osien. Laippa sopii hyvin tuoteperheen konfiguroimisen sovelluskohteeksi, sillä sen rakenteen on muututtava olosuhteiden ja tilanteen mukaan, joten asiakkaidenkin toiveet laipan rakenteesta vaihtelevat. Tässä esimerkissä asiakas voi itse valita laippaan taulukossa 1 olevat ominaisuudet. Skaalautuville muuttujille on määritetty arvoväli, kun taas moduuleille valintamahdollisuudet "YES" tai "NO". Valinnalla "YES" moduuli tulee mukaan tuotteeseen, ja valinnalla "NO" moduuli jää tuotteesta pois.

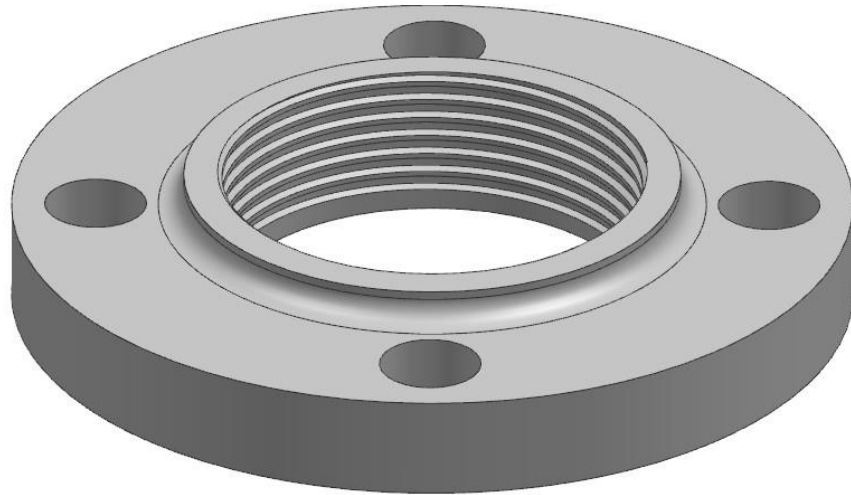
**Taulukko 1.** Laippaan konfiguroitavat ominaisuudet ja niiden valintamahdollisuudet.

<b>Ominaisuus</b>	<b>Valintamahdollisuus</b>
Keskireiän halkaisija	75–200
Paksuus	10–50
Reikien lukumäärä	2–16
Kaulus	YES/NO
Kierteet	YES/NO

Parametrinen konfigurointi käytetään halkaisijan ja paksuuden määrittämiseen, jolloin niiden parametrien arvoja muuttamalla voidaan skaalata tuotteen kokoa. Parametrinen konfigurointi on myös kiinnitysreikien lukumäärän valinta. Halkaisija ja paksuus ovat parametrisia skaalautuvia muuttujia, kun taas kiinnitysreikien lukumäärä on konfiguroituva skaalautuva muuttuja. Modulaarista konfigurointiä käytetään laipan kauluksen ja kierteiden valintaan, sillä ne voidaan käsittää erillisinä moduuleina, jotka voidaan joko valita lopulliseen tuotteeseen mukaan tai jättää siitä pois. Kierteiden valinta edellyttää kuitenkin, että laipassa on kaulus.

## 4.2 Laipan konfigurointi

Tuoteperheen konfigurointi aloitetaan mallintamalla tuotealusta, joka toimii perustana tuoteperheen muodostamiselle. Ensin luodaan mallin parametrit ja määritetään niille arvot. Mallin parametrit kannattaa nimetä kuvaavilla nimillä. Tällöin on helppo tunnistaa, mitä mittaa ollaan muuttamassa konfiguroitavassa tuotteessa. Kun 3D-mallia aletaan parametrsoimaan, mitat voidaan määrittää alussa luotujen parametrien avulla. Koska asiakas pystyy tässä esimerkissä valitsemaan keskireiän halkaisijan, mallin rakentumisen kannalta on oleellista, että muut mitat laipan tasossa skaalautuvat suhteessa keskireiän halkaisijaan. Nämä mitat on parametrsoitu käyttämällä yhtälöitä, joissa muuttujana on keskireiän halkaisija. Tällöin keskireiän parametrin muuttaminen vaikuttaa myös muihin mittoihin, jolloin ne muuttuvat oikeassa suhteessa. Muut keskeiset parametrit, jotka täytyy määrittää ovat paksuus ja reikien lukumäärä, sillä niihin asiakkaan täytyy pystyä vaikuttamaan. Tuotealustaan on myös sisällytetty parametrien ja päättelysääntöjen eli If – Then -rakenteen avulla arvovälit skaalautuville muuttujille, jotka rajaavat asiakkaan mahdollisuuksia räätälöidä tuotetta. Kuvassa 4 on täysin parametrsoitu laippojen tuoteperheen yhteisen tuotealustan 3D-malli, johon perustuen tuoteperhe voidaan konfiguroida.



**Kuva 4.** Tuotealustan 3D-malli.

Part Families -työkalun avulla Excelin laskentataulukoon valitaan järjestyksessä halutut parametrit sekä piirteet, joihin asiakkaalla on mahdollista vaikuttaa. Kun ne on valittu, siirrytään Excelin näkymään, jossa tuotevariantteja voidaan alkaa muokkaamaan laskentataulukossa. Laskentotaulukoon mukaan valitut parametrit ja piirteet näkyvät kuvassa 5.

The screenshot shows the 'Part Family Spreadsheet' interface. At the top, there is an 'Actions' section with several icons. Below it is a 'Chosen Columns' table with the following data:

Name	Type
DB_PART_NO	
OS_PART_NAME	
Keskireiän_halkai...	
Paksuus	
Reikien_lkm	
Kaulus(6)	
Kierteet(13)	

At the bottom of the interface, there is a 'Part Family Spreadsheet' section with a 'Create Spreadsheet' button and a spreadsheet icon.

**Kuva 5.** Laskentataulukoon mukaan valitut parametrit ja piirteet.

Taulukoon muodostuu automaattisesti solut kappaleen numerolle, nimelle ja muutettaville parametreille sekä piirteille (taulukko 2). Taulukoon voidaan lisätä rivejä uusille tuotevarianteille halutuilla parametreilla. Variantteja on mahdollista luoda niin paljon kuin

on tarvetta. Piirteiden mittoja ei voida laskentataulukossa muuttaa kuten parametrien arvoja, vaan ne voidaan sisällyttää mukaan tuotteeseen tai jättää siitä pois merkkamalla piirteen sarakkeeseen tietyn tuotteen kohdalle ”YES” tai ”NO”.

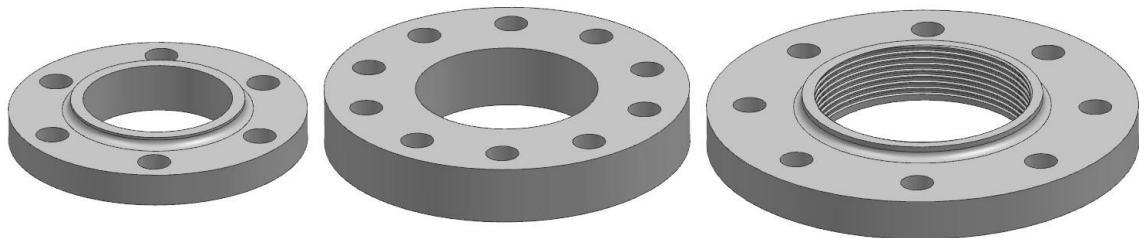
**Taulukko 2.** Tuotevarianttien parametrien ja piirteiden määrittäminen Excelin laskentataulukkoon.

<i>DB_PART_NO</i>	<i>OS_PART_NAME</i>	<i>Keskireiän_halkaisija</i>	<i>Paksuus</i>	<i>Reikien_lkm</i>	<i>Kaulus(6)</i>	<i>Kierteet(13)</i>
1	Tuote 1	90	20	6	YES	NO
2	Tuote 2	110	35	10	NO	NO
3	Tuote 3	130	25	8	YES	YES

Kun tuotevariantit on parametrisoitu, tuoteperhe tallennetaan, minkä jälkeen tuotteista voidaan luoda 3D-mallit omiin tiedostoihinsa. Tämän jälkeen osat voidaan tarvittaessa esimerkiksi lisätä mukaan kokoonpanoon. Laskentataulukkoa päästään muokkaamaan uudestaan tuotealustan 3D-mallin tiedoston kautta Part Families -työkalun avulla. Aiemmin luotujen tuotevarianttien parametreja voidaan muokata tai luoda uusia tuotevariantteja laskentataulukkoon.

### 4.3 Tulokset ja tulosten analysointi

Esimerkissä muodostetaan konfiguroinnin tuloksena kolme varianttia laipasta. Kuten kuvasta 6 nähdään, tuotteiden ominaisuudet ja piirteet poikkeavat toisistaan, mutta kaikki tuotteet rakentuvat kuitenkin yhteisestä mallista. Vasemmalla oleva tuote 1 on kaulustettu laippa, jossa halkaisija on pienin, ja siinä ei ole kierteitä ollenkaan. Keskimäinen tuote 2 on levylaippa, jossa ei ole kaulusta, ja se on lisäksi muita tuotteita paksumpi. Kiinnitysreikiä on myös enemmän kuin toisissa varianteissa. Tuote 3 on kaulustettu kierrelaippa, jossa halkaisija on kaikista suurin ja kiinnitysreikien määrä sekä paksuus on taas erilainen kuin muissa tuotteissa.



**Kuva 6.** Excelin avulla konfiguroitu laippojen tuoteperhe.

Vaikka esimerkki onkin yksinkertainen verrattuna moniin todellisiin konfiguroitaviin tuotteisiin, havainnollistaa se tuoteperheen konfigurointiprosessin etenemisen CAD-ohjelman avulla. Kun tuotealusta on huolellisesti rakennettu, tuotevarianttien konfigurointi

Excelin ja Part Families -komennon avulla ei vaadi juurikaan työtä. Kaikki tuotteet muodostuvat käyttäen samaa materiaalia ja rakennetta, joka sisältää tuotteen rakentumisen kannalta keskeiset muuttujat ja suunnittelutiedot. Ne muodostavat tuoteperheen tuotealustan, josta pystytään konfiguroimaan erilaisia tuotteita, kuitenkin 3D-mallin sisältämien yhtälöiden ja päättelysääntöjen rajoittamana.

Olennaista esimerkin konfiguroinnin kannalta on tunnistaa ominaisuudet, jotka tuovat arvoa asiakkaalle sekä rajata heille sopiva valinnanvara räätälöidä tuotetta. Keskireiän halkaisijan muuttaminen on kaikista tärkein laipan ominaisuus, jotta laippaa voidaan käyttää liittämään erikokoisia putkistokomponentteja toisiinsa. Tämän takia on tärkeää, että muut mitat laipan tasossa skaalautuvat yhtälöiden avulla suhteessa keskireiän halkaisijaan. Lisäarvoa tuovat kiinnitysreikien lukumäärän, paksuuden, kauluksen ja kierteiden valinta. Sopivan valinnanvaran rajaaminen onnistuu käyttämällä parametreja ja If – Then -rakennetta. Tällöin ei tule vahingossa tilannetta, jossa asiakas konfiguroi tuotteesta luonnottoman näköisen. Jos paksuus olisi esimerkiksi suurempi kuin halkaisija, ei tuote näyttäisi enää juurikaan laipalta.

Koska tuotteeseen kohdistuvat asiakkaiden vaatimukset ovat riittävän samankaltaiset, tuotteen muodostamisessa voidaan hyödyntää modulaarista rakennetta, joka mahdollistaa tuotteen muokattavuuden. Parametrisen konfiguroinnin avulla laipan kokoa, kiinnitysreikien määrää ja etenkin keskireiän halkaisijaa saadaan muutettua siihen liitettävän putkistokomponentin halkaisijan mukaan. Modulaarisen konfiguroinnin avulla laipan rakennetta saadaan muutettua riippuen sen käyttötarkoituksesta. Tällöin on mahdollista luoda suuri määrä tuotevariantteja erilaisiin asiakastarpeisiin.

Tietokoneavusteinen suunnittelu on esimerkin perusteella olennainen apuväline konfiguroinnin suorittamiseen ja tuotevarianttien automaattiseen rakentumiseen. Kun tuotealustan 3D-malli on täysin parametrisoitu ja mallin mitat määritetty keskeisten parametrien avulla, tuoteperheen modulaarista ja parametrista konfigurointia voidaan soveltaa tuoteperheen luomiseen yhteiseltä tuotealustalta. Mallin parametrinen rakenne mahdollistaa varianttien muodostamisen ja näin ollen konfiguroitavien tuotteiden mallinnuksen. Tuotealustan 3D-malli sisältää erilaisia suunnittelutietoja parametrien, yhtälöiden, päättelysääntöjen ja laskentataulukon muodossa. Näiden avulla CAD-ohjelma osaa muodostaa itsegeneroituvan mallin rakenteen automaattisesti uudelleen. Lisäksi laskentataulukko mahdollistaa parametrijoukkojen hallinnan sekä sisältää tiedon tuoteperheen moduuleista. Tuotealusta sisältää siis tiedon, miten asiakas voi konfiguroida alustalta erilaisia tuotevariantteja. Suunnittelijan valitsemien parametrien liittäminen Excelin laskentataulukon ei vaadi juurikaan työtä. Uusien tuotevarianttien luominen tai vanhojen päivittäminen onnistuu muutamassa minuutissa, jos parametrien arvot ovat selvillä.



Esimerkki osoittaa, että konfiguroinnin avulla pystytään täyttämään asiakkaiden erilaiset toiveet. Tuotteiden konfigurointiprosessin aikana ei enää tarvita insinöörisuunnittelua, sillä tuotealusta sisältää mallin rakentumisen kannalta oleellisen tiedon. Tuoteperhesuunnittelua käyttämällä voidaan hyödyntää tuotteiden yhteisiä ominaisuuksia niiden muodostamisessa. Tuoteperheen käyttö vähentää esimerkin samankaltaisten tuotteiden konfiguroinnissa ja suunnittelussa toistaiseen suunnittelun tarvetta ja suunnitteluun käytettyä kokonaisaikaa. Vaikka toimivan tuotealustan suunnitteluun käytettävä aika on suurempi kuin yksittäiseen tuotteen suunnitteluun käytettävä aika, panostus suunnitteluun maksaa itsensä takaisin, kun tuotevariantteja täytyy luoda suuria määriä. Hyöty korostuu entisestään, mitä enemmän samaa tuotealustaa voidaan hyödyntää erilaisten tuotevarianttien suunnitteluun ja uusien tuotealustojen kehittämiseen.

Tuoteperheitä ja niiden konfigurointia kannattaa yrityksissä hyödyntää jatkossa vielä enemmän, sillä asiakaskohtaisten tuotteiden kysyntä ei ole ainakaan pienentymässä. Tuoteperheen konfiguroinnin käyttöä yrityksessä kannattaa alkaa miettimään, jos tuotteesta löytyy rakenne, josta muita samankaltaisia tuotteita voidaan alkaa muodostamaan. Myös asiakkaalle arvoa tuottavat ominaisuudet tulee tunnistaa ja niitä täytyy pystyä muokkaamaan erilaisten asiakkaiden mieltymysten perusteella. Lisäksi kehittyvä CAD-teknologia ja konfiguraattorit tarjoavat konfiguroinnin toteuttamiseen yhä parempia keinoja.

## 5. YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli tutkia konfiguroinnin käyttöä tuoteperheen muodostamisessa ja etenkin tuoteperheen konfiguroinnin mahdollistavia tekijöitä. Lisäksi tavoitteena oli tutkia tietokoneavusteisen suunnittelun hyödyntämistä tuoteperheen konfigurointiprosessissa sekä selvittää tuoteperheiden ja niiden konfiguroinnin tuomia hyötyjä yrityksille.

Yritysten on kyettävä vastaamaan asiakkaiden kasvaviin, tuotteeseen ja tuotevalikoimaan kohdistuviin vaatimuksiin, mihin modulaariseen tuotealustaan perustuvien tuoteperheiden konfigurointi on kustannustehokas ratkaisu. Modulaarinen tuotealusta ja tuotepohjesuunnittelu eivät itsessään auta yksilöityjen tuotevarianttien muodostamisessa asiakkaalle, vaan siihen tarvitaan konfigurointia ja konfiguraattoreita. Asiakkaat voivat tällöin osallistua tuotteen suunnitteluprosessiin, mikä on edellytyksenä massaräätälöinnin saavuttamiseksi. Erilaisia konfiguroinnin mahdollistavia tekijöitä ovat siis konfiguraattorit, modulaarisuus, tuotealusta ja tuotepohjesuunnittelu.

Kun modulaarisen ja parametrisen konfiguroinnin periaatteita noudatetaan tuotealustan 3D-mallin muodostamisessa ja samankaltaisten tuotteiden suunnittelussa, tuotealustalta on mahdollista konfiguroida suuria määriä asiakaskohtaisia tuotteita. Asiakkaat voivat muodostaa erilaisia tuotevariantteja moduulien avulla tai skaalata tuotteen kokoa käyttötarkoituksiinsa sopivaksi. Tietokoneavusteisen suunnittelu on olennainen apuväline konfiguroinnin toteuttamiseen. CAD-ohjelma osaa muodostaa parametrisen ja itsegeneroituvan mallin rakenteen uudelleen, jolloin tuotevarianttien konfigurointiin voidaan käyttää erilaisia CAD-ohjelmien työkaluja, kuten Siemensin Part Families.

Konfiguroitavan tuoteperheen valmistukseen ja suunnitteluun löytyi useita syitä ja hyötyjä. Tärkeimmäksi syyksi osoittautui asiakkaiden monenlaisten vaatimusten täyttäminen konfiguroinnin avulla. Muita todettuja hyötyjä olivat esimerkiksi läpimenoaikojen lyhentyminen, tuotantoprosessien yksinkertaistumien sekä kontrolloiminen, asiakaskohtaisen suunnittelun vähentyminen, kustannustehokkaan sekä laajan tuotevalikoiman tarjoaminen ja tuotteiden laadun paraneminen.

Soveltava esimerkki tuoteperheen konfiguroimisesta laipalle havainnoi yksinkertaisuudessaan tuotevarianttien konfiguroinnin ideaa ja sen potentiaalisia hyötyjä. Myös tuotteen modulaarisen rakenteen, tuotealustan ja mallin parametrisoinnin tarkoitus tulivat esille esimerkissä. Tuoteperheen konfigurointi CAD-ohjelman ja siihen yhdistetyn Excelin avulla onnistui ilman toistaiseen suunnittelun tarvetta ja pienemmällä vaivalla verrat-

tuna varianttien mallintamiseen yksitellen. Tuotealustalta pystyttiin konfiguroimaan erilaisiin asiakkaiden tarpeisiin vastaavia tuotteita ilman asiakaskohtaisen suunnittelun tarvetta konfigurointiprosessin aikana. Työkalu osoittautui hyödylliseksi apuvälineeksi tuoteperheen konfigurointiin, sillä tuotevarianttien muodostaminen ja muokkaaminen oli yksinkertaista, kun tuotealustan 3D-malli oli tehty huolellisesti.

Tässä työssä ei perehdytty yksityiskohtaisemmin konfiguroituvan tuotteen rakenteen suunnitteluun ja tutkimus keskittyi vain fyysisiin tuotteisiin. Työssä käsiteltiin tuotteen räätälöimistä modulaarisen ja parametrisen konfiguroinnin avulla, joten pinnan räätälöinti ja generatiivinen räätälöinti jäivät tutkimuksen ulkopuolelle. Jatkotutkimusideana tuotteelle voisi kehittää konfiguraattorin, johon asiakas voisi syöttää laipan ominaisuudet, ja konfiguraattori muodostaisi CAD-ohjelman avulla 3D-mallin tuotteesta asiakkaan nähtäväksi. Jatkotutkimus voisi olla myös haastattelututkimus, jossa selvitettäisiin konfiguroinnin tuomia hyötyjä yrityksille sekä konfiguroinnin käyttöä yrityksissä.

## LÄHTEET

- Agard, B. & Kusiak, A. (2004). 'Data-mining-based methodology for the design of product families', *International Journal of Production Research*, Vol. 42(15), pp. 2955–2969. doi:10.1080/00207540410001691929
- Bodein, Y., Rose, B. & Caillaud, E. (2014). 'Explicit reference modeling methodology in parametric CAD system', *Computers in Industry*, Vol. 65(1), pp. 136–147. doi:10.1016/j.compind.2013.08.004
- Fornasiero, R. & Carpanzano, E. (2017). 'Advances in customer-oriented manufacturing and value chain management', *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 30(7), pp. 677–679. doi:10.1080/0951192X.2017.1314016
- Grabowik, C., Kalinowski, K., Kempa, W. & Paprocka, I. (2015). 'A method of computer aided design with self-generative models in NX Siemens environment', *IOP conference series, Materials Science and Engineering*, Vol. 95(1), p. 12123. doi:10.1088/1757-899X/95/1/012123
- Hermans, G. (2012). 'A model for evaluating the solution space of mass customization toolkits', *International Journal of Industrial Engineering and Management*, Vol. 3(4), pp. 205–214.
- Hirz, M., Dietrich, W., Gfrerrer, A. & Lang, J. (2013). 'Modeling Techniques in CAD', in 'Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development', Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 241–308. doi:10.1007/978-3-642-11940-8\_4
- Jiao, R.J., Simpson, T.W. & Siddique, Z. (2007). 'Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review', *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 18(1), pp. 5–29. doi:10.1007/s10845-007-0003-2
- Jørgensen, K.A. (2009). 'Product Configuration and Product Family Modelling', Aalborg University, pp. 1–27. Available at: [https://www.kaj.person.aau.dk/digitalAssets/199/199584\\_49143\\_productconfigurationandproductfamilymodelling.pdf](https://www.kaj.person.aau.dk/digitalAssets/199/199584_49143_productconfigurationandproductfamilymodelling.pdf) (Accessed: 9 March 2022)
- Juuti, T. (2008). 'Design Management of Products with Variability and Commonality - Contribution to the Design Science by elaborating the fit needed between Product Structure, Design Process, Design Goals, and Design Organisation for Improved R&D Efficiency', Tampere University of Technology.
- Kloock-Schreiber, D., Domarkas, L., Gembarski, P.C. & Lachmayer, R. (2019). 'Enrichment of Geometric CAD Models for Service Configuration', *CEUR Workshop Proceedings*, pp. 22–29.
- Lehnerd, A.P. & Meyer, M.H. (2011). 'The power of product platforms', Riverside: Free Press. Available at: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4934625> (Accessed: 2 March 2022)
- Lutters, E. (2019). 'Computer-Aided Design', in 'The International Academy for Production Engineering', *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 325–327. doi:10.1007/978-3-662-53120-4\_6443

- Magnusson, M. & Pasche, M. (2014). 'A Contingency-Based Approach to the Use of Product Platforms and Modules in New Product Development', *The Journal of product innovation management*, Vol. 31(3), pp. 434–450. doi:10.1111/jpim.12106
- Pakkanen, J. (2015). 'Brownfield Process: A Method for the Rationalisation of Existing Product Variety towards a Modular Product Family', Tampere University of Technology.
- Pakkanen, J., Juuti, T. & Lehtonen, T. (2016). 'Brownfield Process: A method for modular product family development aiming for product configuration', *Design studies*, Vol. 45, pp. 210–241. doi:10.1016/j.destud.2016.04.004
- Parisher, R.A. & Rhea, R.A. (2012). 'Pipe drafting and design, third edition', 3rd ed., Waltham, Mass: Gulf Professional Pub.
- Paunu, P. & Mäkipää, M. (2014). 'Design Configurator Requirements for IS Integration', in 'Proceedings of the 7th World Conference on Mass Customization, Personalization, and Co-Creation', Aalborg, Denmark, February 4th - 7th, 2014, Springer International Publishing, pp. 129–138.
- Piller, F.T. & Tseng, M. (2009). 'Handbook Of Research In Mass Customization And Personalization - Volume 1: Strategies and Concepts', Singapore: World Scientific Publishing Company.
- Ptak, C. & Smith, C. (2011). 'Repetitive Manufacturing Application', in 'Orlicky's Material Requirements Planning', 3rd ed., New York: McGraw-Hill Education, pp. 315–327. Available at: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071755634/chapter/chapter19>
- Siemens (2017a). 'Part Families'. Available at: [https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx\\_help#uid:xid1128417:index\\_modeling:part\\_families prt-fam\\_ov](https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:xid1128417:index_modeling:part_families prt-fam_ov) (Accessed: 3 February 2022)
- Siemens (2017b). 'Workflow for part families' Available at: [https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx\\_help#uid:xid1128417:index\\_modeling:part\\_families prt-fam\\_ov:xid654878](https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/nx/12/nx_help#uid:xid1128417:index_modeling:part_families prt-fam_ov:xid654878) (Accessed: 3 February 2022)
- Simpson, T.W. (2006). 'Product Platform and Product Family Design: Methods and Applications', 1st ed., 2006, New York, NY: Springer US.
- Simpson, T.W., Jiao, J., Siddique, Z. & Hölttä-Otto, K. (2014). 'Advances in Product Family and Product Platform Design Methods & Applications', 1st ed., 2014, New York, NY: Springer. doi:10.1007/978-1-4614-7937-6
- Simpson, T.W., Maier, J.R.A. & Mistree, F. (2001). 'Product platform design: method and application', *Research in Engineering Design*, Vol. 13(1), pp. 2–22.
- Smith, P. (2005). 'Piping Materials Guide', Amsterdam: Gulf Professional Publishing. Available at: <http://libproxy.tuni.fi/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=cookie,ip,uid&db=e000xww&AN=117185&site=ehost-live&scope=site>
- Stroud, I. & Nagy, H. (2011). 'Solid Modelling and CAD Systems: How to Survive a CAD System', 1st ed., 2011, London: Springer.
- Tiihonen, J. & Soininen, T. (1998). 'Configurable products-Lessons learned from the Finnish Industry', Helsinki University of Technology.

Tseng, M.M., Jiao, J. & Merchant, M.E. (1996). 'Design for Mass Customization', *CIRP Annals*, Vol. 45(1), pp. 153–156. doi:10.1016/S0007-8506(07)63036-4

Tseng, M.M., Wang, Y. & Jiao, R.J. (2019). 'Mass Customization', in 'The International Academy for Production Engineering', *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 1142–1150. doi:10.1007/978-3-662-53120-4\_16701

Tseng, M.M., Wang, Y. & Jiao, R.J. (2019). 'Modular Design', in 'CIRP Encyclopedia of Production Engineering', Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 1226–1235. doi:10.1007/978-3-662-53120-4\_6460

Walsh, R.A. (2006). 'Computer-Aided Design, Manufacturing, and Engineering Systems', in 'McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook', 3rd ed., New York: McGraw-Hill Education, pp. 297–321. Available at: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071457873/chapter/chapter6>

Zhao, H., McLoughlin, L., Adzhiev, V. & Pasko, A. (2019). '3D mass customization toolkits design, Part I: Survey and an evaluation model', *Computer-aided design and applications*, Vol. 16(2), pp. 204–222. doi:10.14733/cadaps.2019.204-222