

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

MODULAARISEN ARKKITEHTUURIN HYÖDYNTÄMINEN  
RUMPURAKENTEISISSA PROSESSILAITTEISSA

UTILISING OF THE MODULAR ARCHITECTURE IN THE DRUM STRUCTURED  
PROCESS EQUIPMENT

Lappeenrannassa 10.2.2014

Miikka Kuhanen

## SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO .....	3
1 JOHDANTO .....	4
2 MODULAARISUUS.....	6
2.1 Määritelmä .....	6
2.1.1 Modulaarinen vs. integroitu arkkitehtuuri .....	7
2.2 Rakenteen modulaarisuus .....	9
2.3 Modulaarisuuden edut.....	11
2.4 Rajoitukset ja haitat .....	12
2.5 Modulaarinen suunnittelu ja suunnittelun periaatteet.....	12
2.5.1 MFD - Modular Function Deployment.....	13
3 RUMPURAKENTEISEN PROSESSILAITTEEN MODULARISOINTI .....	17
3.1 Vaatimusten määrittely .....	18
3.1.1 Materiaali-, valmistus-, toiminnalliset vaatimukset.....	18
3.2 Modulaarisuus rumpurakenteen kannalta .....	19
3.3 Modulaaristen konseptien luominen .....	20
3.3.1 Rumpurakenne .....	20
3.4 Liittämis- ja kiinnitysmahdollisuudet .....	22
4 TULOSTEN TARKASTELU.....	24
5 YHTEENVETO .....	26
LÄHTEET .....	27

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

DSM	Design Structure Matrix - Rakenteen analysointiin kehitetty menetelmä
MFD	Modular Function Deployment - Systemaattinen tuotekehitysmenetelmä modulaaristen tuotteiden ja tuoteperheiden suunnittelemiseksi
MIM	Module Indication Matrix - Moduulin osoitusmatriisi
QFD	Quality Function Deployment - Tuotekehitysmenetelmä, jonka tavoitteena on muuttaa tuotteen asiakastarpeita tuoteominaisuuksiksi tai suunnitteluvaatimuksiksi

## 1 JOHDANTO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää, miten modulaarista arkkitehtuuria voitaisiin hyödyntää rumpurakenteisissa prosessilaitteissa. Työ on rajattu koskemaan ainoastaan teollisuudessa olevia rumpurakenteisia prosessilaitteita. Kuvassa 1 näkyy esimerkki rumpumallisesta prosessilaitteesta, joita teollisuudessa käytetään. Nykyisissä suurissa rumpurakenteisissa laitteissa ei juuri ole hyödynnetty modulaarisuutta ja modulaarista rakennetta, vaan niissä on hyödynnetty suureksi osaksi umpinaista yhtenäistä rakennetta. Tästä syystä työssä selvitetään mitä modulaarisella rakenteella saavutettaisiin.



**Kuva 1.** Rumpumallinen keräyspaperimassan käsittelylaitteisto (Voith).

Työn teoriaosuudessa selvitetään, millaisia etuja modulaarisella rakenteella saavutetaan rumpurakenteisissa laitteissa sekä millaisia ongelmia modulaarisuus tuo mukanaan. Lisäksi työssä selvitetään, millaisia vaatimuksia modulaarisuus asettaa ja perehdytään tarkemmin modulaariseen suunnitteluun ja suunnittelun periaatteisiin. Lisäksi luodaan erilaisia modulaarisia konsepteja rumpurakenteelle ja tutkitaan niiden toimivuutta. Salassapitosyistä työn toimeksiantajaa ja sovelluskohteita ei ole lupa mainita, joten asioita käsitellään yleisellä tasolla.

Työ on tehty osana ”Prosessilaitte 2015 - Kevennetyt ja älykkäät materiaaliratkaisut prosessilaitteissa” -katalyyttihanketta. Kaakkois-Suomen osaamiskeskus KOSKEN käynnistämän hankkeen tavoitteena on selvittää sopivimmat kohteet älykkäiden materiaalitekniikan ratkaisujen hyödyntämiselle sekä parantaa suomalaisen koneteollisuuden ja toimilaitteiden kilpailukykyä maailmalla. Lisäksi hankkeen avulla pyritään yksilöimään sopivat kohteet älykkäiden materiaalien käyttöönotolle prosessilaittekehityksessä ja -rakenteissa. (Yritystele, 2012.)

KOSKEN katalyyttihankkeen tavoitteena on myös selvittää potentiaalisimmat kohteet esimerkiksi muistimetallien ominaisuuksien hyödyntämiseen. Selvityksen valmisteluprosessi sisältää tarkan selonteon siitä, kuinka kyseessä olevia materiaaleja ja menetelmiä voidaan hyödyntää. Lisäksi tutkitaan, miten ratkaisut vaikuttavat kestäväan kehitykseen, kustannuksiin ja käyttäjälisäarvoon. (Yritystele, 2012.)

## 2 MODULAARISUUS

### 2.1 Määritelmä

Moduloinnista on olemassa lukuisia eri käsityksiä, eikä yhtä tiettyä määritelmää ole. Moduloinnilla tarkoitetaan yleisesti tuotteen jakamista erilaisiin yksittäisiin moduuleihin. Moduulit eli toiminnalliset komponentit ovat irrotettavissa tuotteesta ja niillä on tarkoin määritetyt rajapinnat. Näiden vakioina pidettävien rajapintojen avulla moduuleja pystytään yhdistelemään ja vaihtamaan. Jotta moduulien välisistä rajapinnoista saataisiin mahdollisimman yksinkertaisia, pyritään saavuttamaan yhteneväisyydet toiminnallisen ja fyysisen rakenteen välillä. Tämän avulla saadaan myös minimoitua moduulien keskinäiset vuorovaikutukset. Moduulien toimintojen tulisi toimia siten, ettei niitä ole jaettu muiden moduuleiden kesken. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 8.)

Erilaisia määritelmiä modulaarisuudesta on lukuisia ja ne perustuvat eri näkökulmiin. Lähtökohtina monesti on toiminnallinen modulaarisuus, sekä valmistettavuuden ja elinkaaren huomioiva modulaarisuus. Toiminnallisen modulaarisuuden näkökulmasta tuote on pystyttävä kasaamaan erilaisilla variaatioilla. Tämä mahdollistetaan moduulien standardoiduilla liittymispinnoilla. Valmistettavuuden huomioivassa modulointimallissa on tärkeää, että moduulit voidaan rakentaa edullisesti ja erillään lopullisesta kokoonpanosta. Moduulia sanotaankin tarkoin suunnitelluksi osakokoonpanoksi, jossa kokoonpantavuus on huomioitava kun suunnitellaan rajapintoja. Elinkaaren huomioivassa mallissa huomioidaan elinkaaren aikaiset prosessit, ja tuote jaetaan niiden perusteella eri osakokoonpanoihin. Tällaisia prosesseja ovat esimerkiksi kokoonpano, suunnittelu, valmistaminen, kierrättäminen, testaaminen ja käyttö. (Koukkunen, 2010, s. 14-15.)

Yleisesti ottaen modulaarisuus ja modulaariseen toimintamalliin siirtyminen vaatii sekä tuotteilta että yrityksiltä osuutensa. Modulaarisen tuotteen kehittämisen ja suunnittelun kustannukset ovat suuria, joten tuotteen uudelleen suunnittelu onnistuu vain pitkällä tähtäimellä. Kustannukset nousevat kun suunnittelu joudutaan toteuttamaan tarkemmin ja lisäksi yksittäisten moduulien testaaminen on haastavampaa ja vie enemmän aikaa kuin kokonaisen tuotteen. Lisäksi tuotteen ominaisuudet ja rakenne muokkautuvat pitkälti jo moduulien suunnitteluvaiheessa. Yritysten on myös varauduttava siihen, että tuotetta

koskevien erityistoiveiden toteuttaminen on hankalampaa kuin kokonaisen tuotteen kohdalla. Vaikkakin moduloinnilla saadaan lisättyä asiakaskohtaista tuotteen muokkaamista, vaihtoehdot rajoittuvat kuitenkin käytännössä ennalta määrättyjen moduulien erilaisiin yhdistelmiin. Modulaariseen rakennemalliin siirtyminen vaatii myös yrityksiltä ja työntekijöiltä tarkkaa tuotetuntemusta ja suunnittelutaitoa, sillä asiantuntevalla ja onnistuneella moduulikomponenttien suunnittelulla säästetään aikaa ja rahaa. (Koukkunen, 2010, s. 20-21.)

### 2.1.1 Modulaarinen vs. integroitu arkkitehtuuri

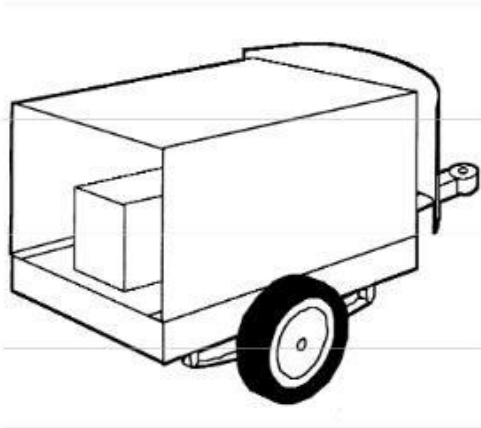
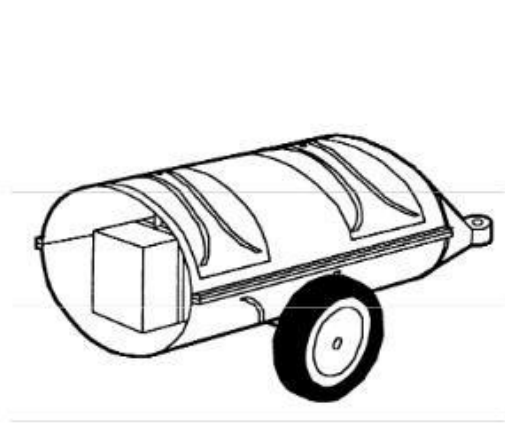
Tuotteen arkkitehtuuri voidaan määritellä esimerkiksi seuraavasti (Eggen, s. 2):

- Toiminnallisten komponenttien kokonaisuus
- Kokonaishahmotelma toiminnallisista komponenteista fyysisiin komponentteihin
- Fyysisten komponenttien vuorovaikutusta rajapintojen välityksellä

Integroituun arkkitehtuuriin kuuluu monimutkaista kartoitusta fyysisten komponenttien ja toimintojen välillä, ja komponenttien välisten rajapintojen liittämistä toisiinsa. Integroidussa arkkitehtuurissa tuotteen toiminnot on toteutettu käyttämällä useita eri komponentteja. Lisäksi yksittäinen komponentti voi toteuttaa useita eri toimintoja. Tuote nähdään aina yhtenä kokonaisuutena, jolloin mm. suunnittelu ja tuotanto tapahtuvat koko tuotteelle yhtä aikaa. (Erikstad, 2009, s. 18.)

Integroidussa rakennemallissa komponenttien välillä on runsaasti monimutkaista vuorovaikutusta, eivätkä vuorovaikutukset eivät ole selkeästi määriteltyjä. Joissakin tapauksissa tästä saattaa olla haittaa tuotteen ensisijaisten toimintojen vakaudelle. Tällä rakennemallilla saavutetaan kuitenkin parempaa suorituskykyä ja energiatehokkuutta, sekä pienempiä kuluja. (Schiffauerova, s. 4.)

Silloin kun moduulien ja toimintojen välillä on suora ns. yksi-yhteen- yhteys (one-to-one), puhutaan modulaarisesta arkkitehtuurista. Modulaarisessa arkkitehtuurissa vuorovaikutukset komponenttien välillä ovat erittäin tärkeitä tuotteen ensisijaisten toimintojen kannalta. Integraalisesta rakennemallista poiketen, ne ovat selkeästi ja tarkasti määriteltyjä. Jokainen komponentti sisältää yhden tai usean toiminnon. Kuvassa 2 näkyy eroavaisuudet modulaarisen ja integroidun ajatusmallin välillä. (Eggen, s. 2.)

*Modulaarinen rakenne**Integroitu rakenne*

**Kuva 2.** Modulaarisen ja integroidun rakenteen hyödyntäminen peräkärriissä (Schiffauerova, s. 5-6).

Modulaarisessa mallissa siis tietty fyysinen komponentti on suoraan yhteydessä tiettyyn tuotteen toimintoon one-to-one- periaatteella, toisin kuin integroidussa mallissa, jossa yhdellä komponentilla on yhteys useaan eri toimintoon. Seuraavassa esimerkki modulaarisen ja integroidun peräkärriyrakenteen eri komponenttien yhteyksistä toimintoihin (Eggen, s. 2-3):

Modulaarinen rakenne:

- |               |  |
|---------------|--|
| - Kuomu       | → Suojaa kuormaa sääolosuhteilta             |
| - Vetokoukku  | → Yhdistää peräkärriyn ajoneuvoon            |
| - Etuprofiili | → Vähentää ilmanvastusta                     |
| - Alusta      | → Kannattelee kuormaa                        |
| - Jousitus    | → Parantaa ajo-ominaisuuksia, iskunvaimennus |



Integroitu rakenne:

- Yläosa → 1. Suojaa kuormaa sääolosuhteilta  
2. Tukee kuormaa
- Alaosa → 1. Suojaa kuormaa sääolosuhteilta  
2. Tukee kuormaa
- Etukoukku → 1. Yhdistää peräkärryn ajoneuvoon  
2. Vähentää ilmanvastausta  
3. Tukee kuormaa
- Kuormaliinat → 1. Tukee kuormaa
- Lokasuojat → 1. Suojaa sääolosuhteilta

## 2.2 Rakenteen modulaarisuus

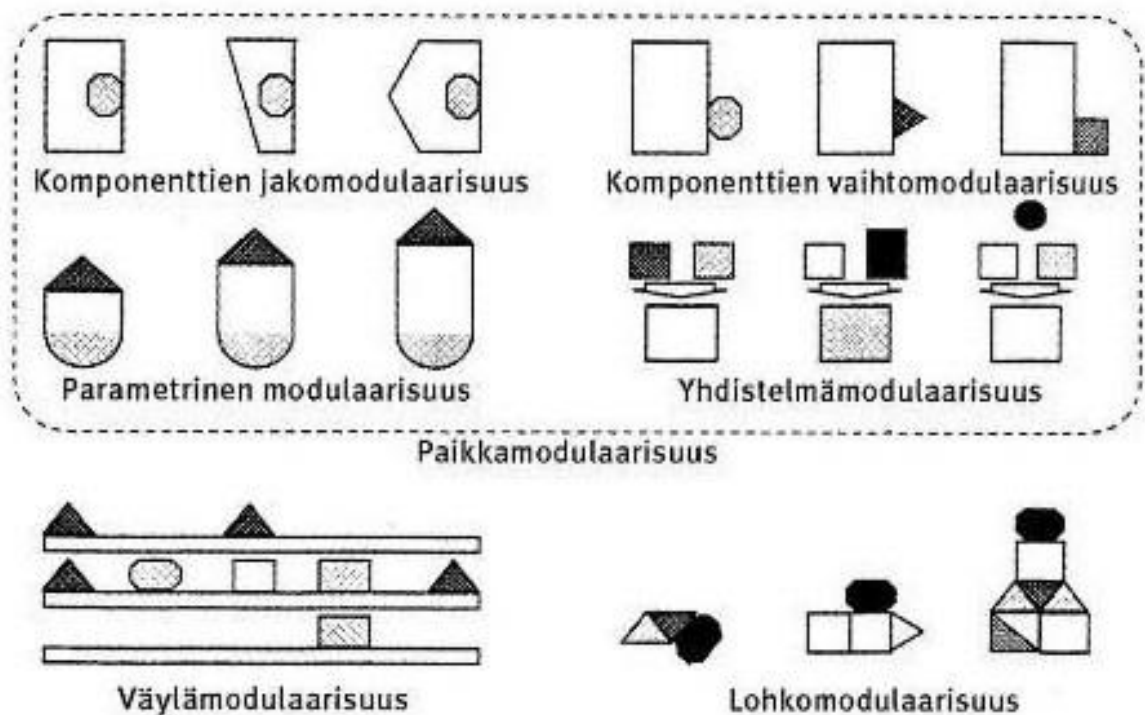
Rakenteen modulaarisuus ja modulaarinen järjestelmä voidaan määrittellä viiden eri tyypin mukaan. Nämä tyypit ovat eritelty taulukossa 1.

*Taulukko 1. Modulaaristen järjestelmien eri tyypit (Österholm & Tuokko, 2001, s. 10).*

SULJETTU JÄRJESTELMÄ	Komponenttinvaihtomodulaarisuus	Paikkamodulaarisuus
	Komponenttienjakomodulaarisuus	
	Parametrinen modulaarisuus	
	Väylämodulaarisuus	Väylämodulaarisuus
AVOIN JÄRJESTELMÄ	Lohkomodulaarisuus	Lohkomodulaarisuus

Paikka-, väylä- ja lohkomodulaarisuus ovat yleiset modulaarisen järjestelmän tyypit. Paikkamodulaarisuus voidaan jakaa komponenttien vaihtomodulaarisuuteen, komponenttien jakomodulaarisuuteen ja parametriseen modulaarisuuteen. Komponenttien vaihtomodulaarisuudessa osa moduuleista on vaihdettavissa, eli samaan tiettyyn tuotteeseen/rakenteeseen pystytään yhdistämään erilaisia moduuleja. Tällöin voidaan saavuttaa uusia tuotekombinaatioita. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 10-11.)

Komponenttien jakomodulaarisuudessa tiettyä moduulia voidaan käyttää useassa eri rakenteessa tai rakenteen kohdassa. Parametrisessä modulaarisuudessa standardikomponentteja pystytään yhdistämään parametrisesti muunneltavan moduulin kanssa. Näiden lisäksi yhdistelmämodulaarisuus on eräs paikkamodulaarisuuden tyyppi. Yhdistelmämodulaarisuus on tietyllä tapaa yhdistelmä kolmesta edellä mainitusta tyypistä, kuten kuvasta 3 nähdään. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 10-11.)



**Kuva 3.** Modulaaristen tyyppien hahmotelmat (Österholm & Tuokko, 2001, s. 11).

Modulaarisen järjestelmän tyypeistä väylämodulaarisuus mahdollistaa eri moduulien liittämisen tiettyyn moduuliin. Perusmoduuli toimii väylänä, johon voidaan liittää erilaisia moduuleja/komponentteja halutussa asennossa. Lohkomodulaarisuus perustuu standardoituihin rajapintoihin, joiden avulla moduuleja/komponentteja voidaan yhdistää vapaamuotoisesti haluamallaan tavalla. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 10-11.)

### 2.3 Modulaarisuuden edut

Modulaarisuudella saavutetaan paljon etuja, joista yritys ja asiakas molemmat hyötyvät. Yrityksien toiminta perustuu monesti suurempaan massatuotantoon tai asiakkaan tilaamaan yksilöityyn tuotteeseen. Modulaarisuudella pyritään löytämään ratkaisu näiden välimaastosta, jonka avulla voidaan hyödyntää molempien etuja. Sanotaan, että modulaarisuuteen johtaa kolme tekijää. Ensimmäinen niistä on valinnanvaran lisääminen. Sen avulla pystytään tuottamaan tiettyyn käyttöön mahdollisimman hyvin soveltuvia tuotteita, kun komponenttivalintoja sekä valinnanvaraa on enemmän.

Toinen on yhtäläisyyksien hyväksikäyttäminen. Sen avulla saadaan vähennettyä työmäärää, kun aiempaa tuotteen suunnittelua voidaan käyttää uudelleen hyödyksi. Monimuotoisuuden minimoimisen avulla voidaan samanaikaisesti valmistaa useita komponentteja kun tuote jaetaan yksittäisiin osiin. Tällöin säästetään myös huomattavasti aikaa. (Koukkunen, 2010, s. 18.)

Oheiseen listaan on koottu oleellisia etuja valmistuksen, kokoonpanon ja suunnittelun kannalta (Aarnio 2003, s. 41-42):

- Tuotteiden jakaminen erilaisiin moduuleihin helpottaa käsittelyä, valmistusta ja kuljetusta.
- Voidaan valmistaa samanaikaisesti haluttu määrä osakokoonpanoja siihen soveltuvalla valmistusmenetelmällä. Tällöin säästetään myös kustannuksissa.
- Osakokonaisuudet voidaan valmistaa erillään toisista.
- Hyödyntämällä yhtäläisyyksiä, suunnittelutyötä ei tarvitse suorittaa joka kerta alusta saakka. Saadaan hyödynnettyä aiemmin tehtyä suunnittelutyötä.
- Osakokoonpanojen testaaminen voidaan suorittaa erillään osakokonaisuudesta, jolloin mahdolliset virheet ja ongelmat havaitaan ajoissa.
- Suunnittelu- ja asennusaika lyhenee ennalta määritettyjen rajapintojen ja moduulimäärien ansiosta.
- Lyhyemmät toimitusajat.
- Varaosa- ja huoltopalveluiden saati helpottuu ja paranee.

## 2.4 Rajoitukset ja haitat

Modulaarisesta rakenteesta löytyy toki myös joitakin haittapuolia sekä yritykselle että asiakkaalle. Yleensä ottaen modulaaristen rakenteiden hyötysuhde on heikompi verrattuna yksittäin valmistettuihin kokoonpanoihin. Lisäksi modulaaristen tuotteiden suunnitteluun liittyy usein korkeat kehityskustannukset, joten muutosten tekemistä tuotteeseen ei suositella pienellä aikavälillä. (Koukkunen, 2010, s. 20-21.)

Suurimmat haittavaikutukset tulevat esille heikosti tehdyn moduulien ja modulaarisuuden suunnittelun seurauksena. Ylimääräisiä kustannuksia ja ajankulua ilmaantuu nopeasti, mikäli sopivia osia joudutaan etsimään ja testaamaan. Modulointi yleisesti antaa asiakkaalle mahdollisuuden vaikuttaa lopputuotteeseen, mutta koska erilaisten kombinaatioiden tekeminen onnistuu usein vain muutamien etukäteen määritettyjen moduulien kesken, ei kaikkia vaatimuksia voida millään toteuttaa. Lisäksi modulaariset tuoterakenteet ja modulaarinen tuotekehitys lisäävät tuotteen kopioinnin riskiä, sillä sen vaikutuksesta tuotteen kehityksen ennustaminen helpottuu. (Koukkunen, 2010, s. 20-21.)

## 2.5 Modulaarinen suunnittelu ja suunnittelun periaatteet

Modulaariseen suunnitteluun on luotu erilaisia menetelmiä, kuten MFD- ja DSM-menetelmät. MFD- eli Modular Function Deployment-menetelmä toimii systemaattisena tuotekehitysmenetelmänä modulaaristen tuotteiden ja tuoteperheiden kehittämisessä. Menetelmä pyrkii ottamaan huomioon kokoonpanon ja valmistettavuuden näkökulman suunnittelussa, ja löytämään parhaan mahdollisen modulaarisen rakenteen tuotteelle. (Koukkunen, 2010, s. 21.)

DSM- eli Design Structure Matrix-menetelmä on kehitetty rakenteen analysointia varten ja se toimii vain apuvälineenä kun määritetään modulaarisia rakenteita ja moduulien keskinäisiä vuorovaikutuksia. DSM ei siis varsinaisesti ota kantaa modulaarisen rakenteen kokonaisuuteen ja siihen millainen sen tulisi olla. (Aarnio, 2003, s. 44.)

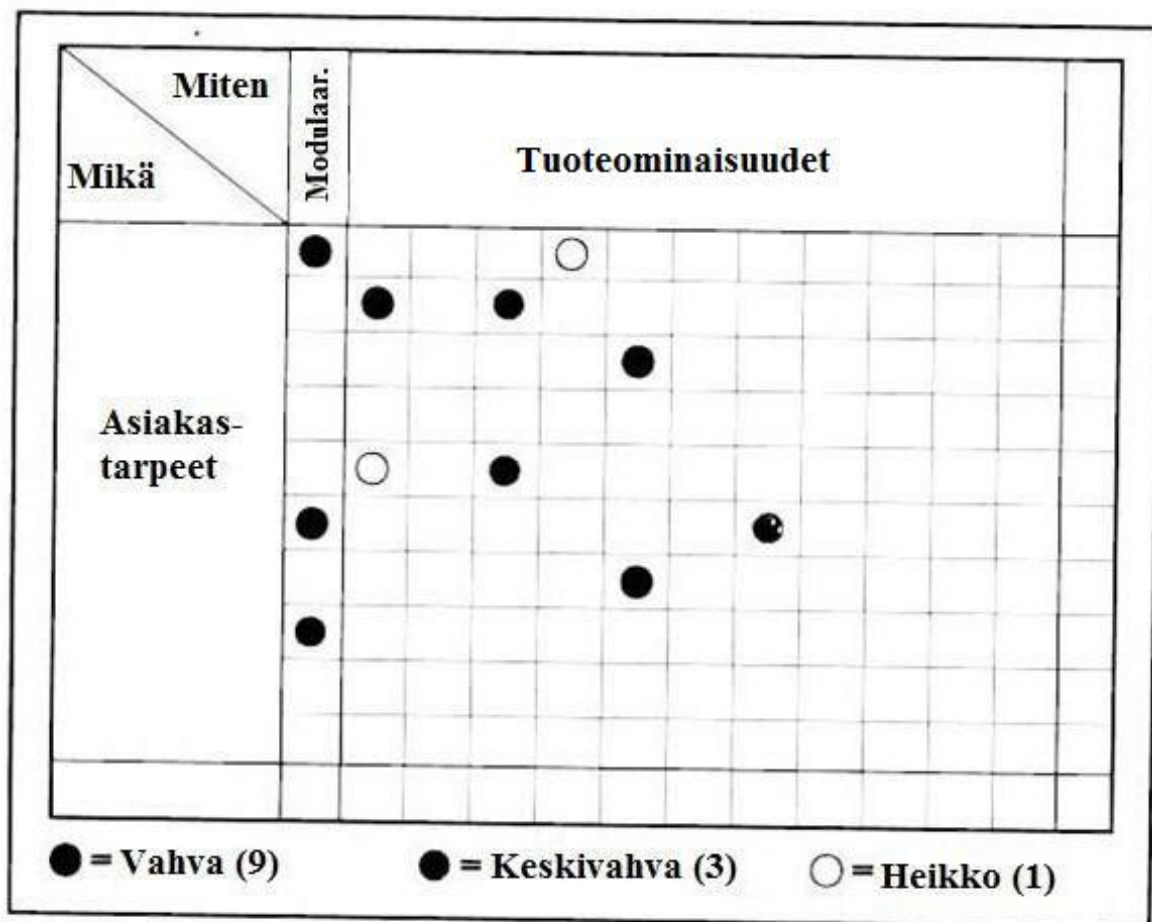
### 2.5.1 MFD - Modular Function Deployment

MFD- menetelmä jaetaan taulukon 2 mukaisesti viiteen eri päävaiheeseen. Ei kuitenkaan ole välttämätöntä suorittaa jokaista vaihetta, vaan voidaan valinnan mukaan aloittaa ja päättyä haluttuun kohtaan. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 18-37.)

*Taulukko 2. MFD- menetelmän päävaiheet (Österholm & Tuokko, 2001, s. 18-37).*

1. Asiakastarpeiden selvittäminen
2. Teknisten ratkaisujen valinta
3. Modulaaristen konseptien muodostaminen
4. Modulaaristen konseptien arviointi
5. Moduulikohtainen suunnittelu

Vaiheiden läpikäynti alkaa ensimmäisestä kohdasta, joka on asiakastarpeiden selvittäminen. Asiakastarpeiden selvittäminen pitää sisällään markkinoiden segmentoinnin ja asiakastarpeiden tunnistamisen. Kun nämä vaiheet on suoritettu, tavoitteena on muuttaa asiakastarpeet Quality Function Deployment eli QFD- analyysin avulla tuoteominaisuuksiksi tai vastaavasti suunnitteluvaatimuksiksi. Näillä tulee olla mitattavissa olevat tavoitearvot, joita voidaan myöhemmin käyttää tuotteiden suunnitteluparametreina. Tuoteominaisuuksien ja asiakastarpeen välille muodostetaan suhde, joka QFD- matriisissa arvioidaan vahvaksi, keskisuureksi tai heikoksi. Kuvassa 4 näkyy malliesimerkki eräänlaisesta QFD- matriisista, jossa vaaka-akselille on asetettu tuoteominaisuudet (Product properties) ja pystyakselille asiakastarpeet (Customer "wants"). Lisäksi modulaarisuus on yksi tuoteominaisuuksista, jonka suhdetta asiakastarpeisiin taulukossa verrataan. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 19-21.)



**Kuva 4.** Quality Function Deployment- matriisi (Eggen, s. 7, muokattu).

MFD- menetelmän toinen vaihe eli teknisten ratkaisujen valinta pitää sisällään toiminnallisemman tarkastelun. Näin ollen tavoitteena on löytää teknisesti parhaat ratkaisut eri toiminnoille. Tämä sisältää teknisten ratkaisujen analysoimisen ja toimintorakenteen luomisen. Tarkasti suoritettujen osien soveltuvuuden analysoimisen ja läpikäymisen päätteeksi saadaan haluttu toimintorakenne sekä parhaat tekniset ratkaisut. (Koukkunen, 2010, s. 23.)

Kolmas vaihe, modulaaristen konseptien muodostaminen, on tärkeä osa menetelmää. Sen tarkoituksena on muodostaa modulaarinen konsepti MIM- osoitusmatriisia (Module Indication Matrix) hyväksikäyttäen. MIM- osoitusmatriisissa vertaillaan aiemmassa vaiheessa valittuja teknisiä ratkaisuja modulointia ohjaaviin tekijöihin. Näiden modulointia

ohjaavien moduulidrivereiden avulla pyritään löytämään erilaisia moduulivaihtoehtoja, jotka muodostuvat yhdessä eri teknisistä ratkaisuista. Teknisiä ratkaisuja ja modulointia ohjaavia tekijöitä vertaillaan painoarvoilla 9 (vahva), 3 (keskivahva) ja 1 (heikko). (Österholm & Tuokko, 2001, s. 24-25.) Yleiset modulointia ohjaavat tekijät eli moduulidriverit on esitetty taulukossa 3.

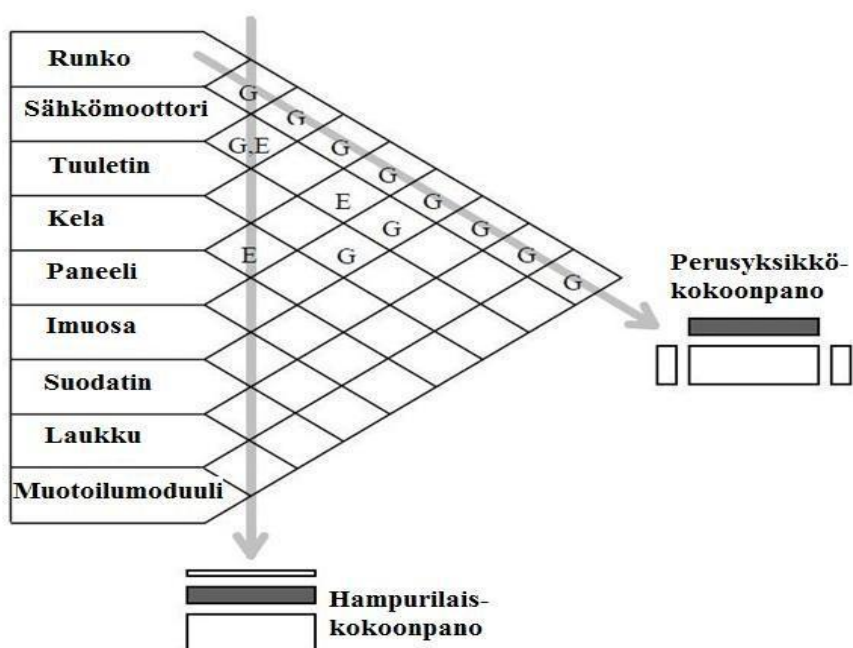
*Taulukko 3. Yleiset modulaarisuutta ohjaavat tekijät (Österholm & Tuokko, 2001, s. 14).*

YRITYKSEN TOIMINTO	MODUULIDRIVERIT, MODULAARISUUTTA OHJAAVAT TEKIJÄT
Suunnittelu ja tuotekehitys	-Tuoteominaisuuksien siirto seuraavaan tuotesukupolveen  -Tekninen kehitys  -Tuotteeseen suunnitellut muutokset
Varioituvuus	-Tekninen variointi  -Ulkonäöllinen variointi
Valmistus	-Yhteinen yksikkö  -Tuotantoprosessi / organisaatio
Laatu	-Erillinen testaus
Alihankinta	-Soveltuva toimittaja saatavilla
Myynnin jälkeinen palvelu	-Huolto / kunnossapito  -Parannus / päivitys  -Kierrätys

Modulaaristen konseptien arviointi on menetelmän neljäs vaihe. Vaiheen tarkoituksena on muodostaa arviointi aiemman vaiheen modulaarisista konsepteista. Konseptivaihtoehtoja tulee arvioida monelta kannalta tuotteen elinkaaren eri vaiheilta. Esille nousevat esimerkiksi konseptien väliset paremmuuserot ja vaikutukset tuotteen kehityskaareen.

Lopputuotteen ja tuotevalikoiman joustavuuden kannalta eräs tärkeä tekijä modulaarisessa tuoterakenteessa on rajapinnat moduulien välillä. Tästä johtuen on erityisen tärkeää arvioida rajapintaliitännät rajapintamatriisin avulla. Rajapintamatriisilla arvioidaan moduulien välisiä rajapintoja ja niiden välisiä vuorovaikutuksia. Sen avulla saadaan helposti selville ns. ei-toivotut liitännät. Rajapintamatriisi toimii siten, että siihen asetetaan moduulit samassa järjestyksessä kun niiden asennus tapahtuu, ja vuorovaikutukset merkitään kirjaintunnuksilla. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 30-32.)

Kuvassa 5 on esitetty rajapintamatriisi, josta nähdään vuorovaikutusten kirjaintunnuksia. Kiinteä rajapinta G liittää moduulit yhteen ja liikkuva rajapinta E siirtää energiaa pyörivän tai edestakaisen liikkuvan voiman muodossa. Lisäksi on väliainetta siirtävä rajapinta E, jossa väliaine on esim. sähköä tai nestettä. Ei-toivotut rajapinnat tunnistetaan siitä, että ne ovat nuolilinjojen ulkopuolella. Lisäksi kuvasta nähdään kaksi samanlaista rajapintaperiaatetta. Rajapintaperiaatteet ovat perusyksikkökokoontalo (Base unit assembly) ja hampurilaiskokoontalo ("Hamburger" assembly). Ensin mainitussa tapauksessa on kyse kokoontalosta, jossa tuote kasataan moduulin ympärille, kun taas jälkimmäisessä tuote kasataan siten, että yksittäinen moduuli tulee aina edellisen moduulin päälle. (Österholm & Tuokko, 2001, s. 32.)



**Kuva 5.** Esimerkki rajapintamatriisista (Eggen, s. 11, muokattu).



Viides eli viimeinen vaihe on moduulikohtaista suunnittelua. Pyrkimyksenä on parantaa moduulikonsepteja moduulitasolla eri tekniikoiden avulla. Tuote tulee suunnitella siten, että se vastaa mahdollisimman tehokkaasti sille suunnitellun tuotantoprosessin vaatimuksia. Koska kustannukset ovat aina hyvin merkittävässä roolissa, tämän vaiheen eräs tärkeä päämäärä on tuotteen osien määrän vähentäminen ja samalla kustannusten alentaminen. Tällöin tulee kuitenkin huomioida tarkkaan se miten tietyn moduulin osien vähentäminen tai lisääminen vaikuttaa koko tuoteperheen osien määrään. Ei kuitenkaan ole varmaa, että koko tuoteperheen osien määrä vähenee vaikka yksittäisen tuotteen osien määrää vähennettäisiinkin. (Koukkunen, 2010, s. 25.)

### 3 RUMPURAKENTEISEN PROSESSILAITTEEN MODULARISOINTI

Rumpurakenteisten prosessilaitteiden ongelmakohdat liittyvät useasti niiden suureen kokoon. Yhtenäisestä rummusta valmistetut usean sadan tonnin painoiset teräsrunkoiset laitteet ovat hankalia valmistaa ja varsinkin kuljetus tuottaa ongelmia. Nykyisten rumpurakenteisten laitteiden massiivinen paino sekä fyysiset mitat luovat kuljetusajoneuvoille ja myös maanteiden kunnolle vaatimuksia. Lisäksi laitteiden asennus ja mahdolliset laitteiden huoltotoimenpiteet luovat omat haasteensa, sillä yhtenäisten rumpurakenteisten laitteiden sisään on hankala päästä. Tavoitteena on helpottaa rumpurakenteen valmistettavuutta, kuljetettavuutta, huoltoa ja keventää rakennetta hyödyntämällä suunnittelussa modulaarisuutta. Päämääränä on selvittää miten modulaarista arkkitehtuuria voitaisiin hyödyntää, tutkitaan millaisia etuja saavutetaan modulaarisella rakenteella ja millaisia vaatimuksia se asettaa. Modulaarisuutta hyödyntämällä luodaan erilaisia konsepteja rumpurakenteisille prosessilaitteille ja tutkitaan niiden toimivuutta. Kuvassa 6 esiintyy kuivaukseen ja jäähdytykseen käytettävä rumpukuivain.



**Kuva 6.** Rumpukuivain (Christian Berner Oy).

### 3.1 Vaatimusten määrittely

#### 3.1.1 Materiaali-, valmistus-, toiminnalliset vaatimukset

Teolliset rumpurakenteiset prosessilaitteet altistuvat monesti esimerkiksi mekaaniselle kulumiselle, suurille voimille, vaihtuville lämpötiloille ja kemialliselle korroosiolle. Nämä asettavat runkorakenteelle vaatimuksia. Näin ollen runkomateriaalilla tulisi olla hyvä lujuus-, kulumis-, hapon- sekä lämmönkestävyys. Monissa rakenteissa on käytetty haponkestävää ruostumatonta terästä. Mahdollisena materiaalivaihtoehtona voidaan esittää esimerkiksi kuitulujitettuja muovikomposiitteja. Muovikomposiitit toisivat keveyttä, kemiallista kestävyyttä, lämmöneristystä, mekaanista lujuutta, jäykkyyttä sekä väsymiskestävyyttä. Taulukossa 4 on esitetty vaatimusprofiili rumpurakenteisille prosessilaitteille.

Taulukko 4. Vaatimusprofiili (Tiimonen, 2008, s. 90-91).

Toimintojen vaatimukset	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Kuormankantokyky</li> <li>-Muodon säilyminen (Ei pysyviä muodonmuutoksia)</li> <li>-Keveys</li> </ul>
Ympäristön vaatimukset	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mekaaniset vaatimukset (Staattinen kuormitus, lujuus, lämpötilat, lujuus)</li> <li>-Kemialliset vaatimukset (Korroosion kestävyys)</li> <li>-Värähtelynvaimennus</li> </ul>
Valmistettavuus	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Valmistusmenetelmät (Valmiit profiilit, liitettävyys, muokattavuus, koneistettavuus)</li> <li>-Valmistusmäärät</li> </ul>
Kustannukset	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Materiaalikustannukset</li> <li>-Käytönaikaiset kustannukset</li> <li>-Valmistuskustannukset</li> </ul>

### 3.2 Modulaarisuus rumpurakenteen kannalta

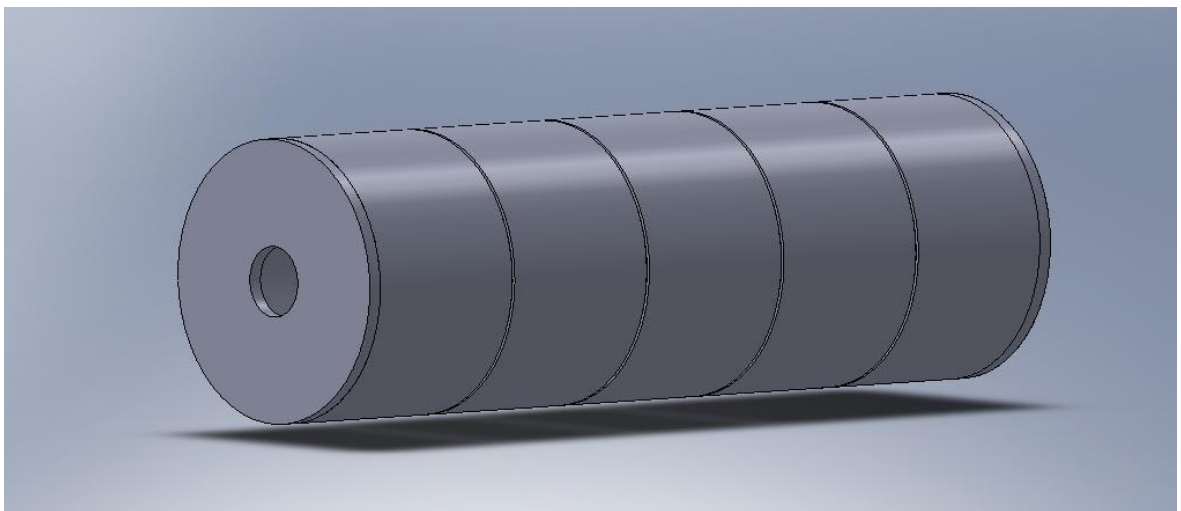
Modulaarisen arkkitehtuurin hyödyntämistä lähdettiin tutkimaan MFD- menetelmän avulla. Kuten todettu, MFD- menetelmän kaikkia vaiheita ei ole välttämätöntä käydä läpi, vaan voidaan edetä tapauskohtaisesti. Kun MFD- menetelmää hyödynnetään teollisuudessa olemassa oleviin rumpurakenteisiin prosessilaitteisiin, ei ole tarvetta aloittaa menetelmän käyttöä ensimmäisistä päävaiheista. Asiakastarpeiden selvittämistä ei ole tarvetta suorittaa, sillä tavoitteena on vain tutkia rumpurakenteisten laitteiden valmistettavuuden parantamis- ja keventämismahdollisuuksia. Myöskään toista vaihetta eli teknisten ratkaisujen valintaa ei tarvitse erikseen tehdä, sillä rumpurakenteen perusmuodot ja materiaalit pysyvät ennallaan. Pääpaino pidetään erilaisten modulaaristen konseptien luonnissa, eli keskitytään MFD- menetelmän vaiheisiin kolme ja neljä. Aloitetaan modulaaristen konseptien luomisella, jonka jälkeen eri konseptit arvioidaan.

### 3.3 Modulaaristen konseptien luominen

Erilaisten modulaaristen konseptien luominen aloitettiin miettimällä mahdollisia moduuliratkaisuja rumpurakenteelle. Pohdinnassa otettiin huomioon rakenteen asettamat vaatimukset ja esimerkiksi tarvittavien moduulien määrä. Moduuliosien määrän kasvaessa myös hajotusaste kasvaa, jolloin myös moduulien välisiä vuorovaikutussuhteita on enemmän. Vastaavasti jos moduuleita on vähemmän, myös moduulien väliset vuorovaikutussuhteet vähenevät. MFD- menetelmän avulla esiin tulevat modulaarisuutta ohjaavat tekijät. Tässä tapauksessa modulaarisuutta ohjaavia tekijöitä ovat valmistus, varioitavuus ja myynnin jälkeinen palvelu.

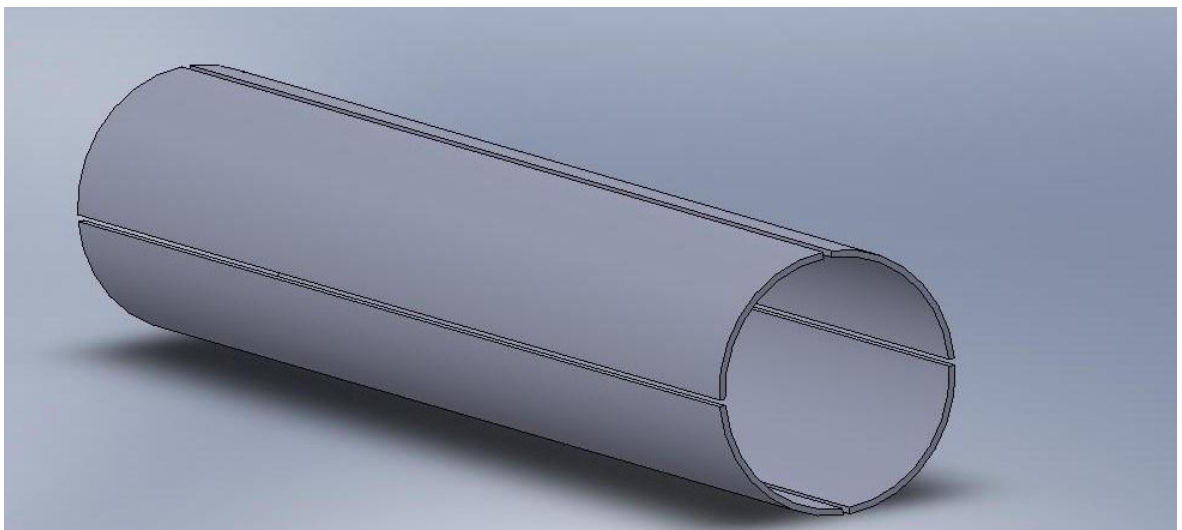
#### 3.3.1 Rumpurakenne

Konseptit luotiin SolidWorks- ohjelmiston avulla. Kuvassa 7 näkyy ensimmäinen konsepti, jossa ideana oli näyttää hahmotelma rumpumaisesta rakenteesta, jonka rumpu on jaettu useampaan samankokoiseen osaan eli moduuliin. Rumpurakenteen modularisointi luo mahdollisuuksia valmistaa halutun mittaisia rumpurakenteita kohteen tarpeiden mukaan. Konsepteissa ajatusmallina käytettiin 8 metrisen teollisuusprosessilaitteen rumpua. Ensimmäisessä konseptissa moduulien koot ovat 1,6 metriä. Tarvittaessa moduuleja lisäämällä tai poistamalla saadaan muokattua rakenteen pituutta, jolloin samoja moduuleja olisi mahdollista käyttää monissa erikokoisissa rumpurakenteisissa laitteissa. Lisäksi yksittäisen moduulin vaihto uuteen ja huoltotoimenpiteet helpottuisivat irrotettavien moduuliosien ansiosta.

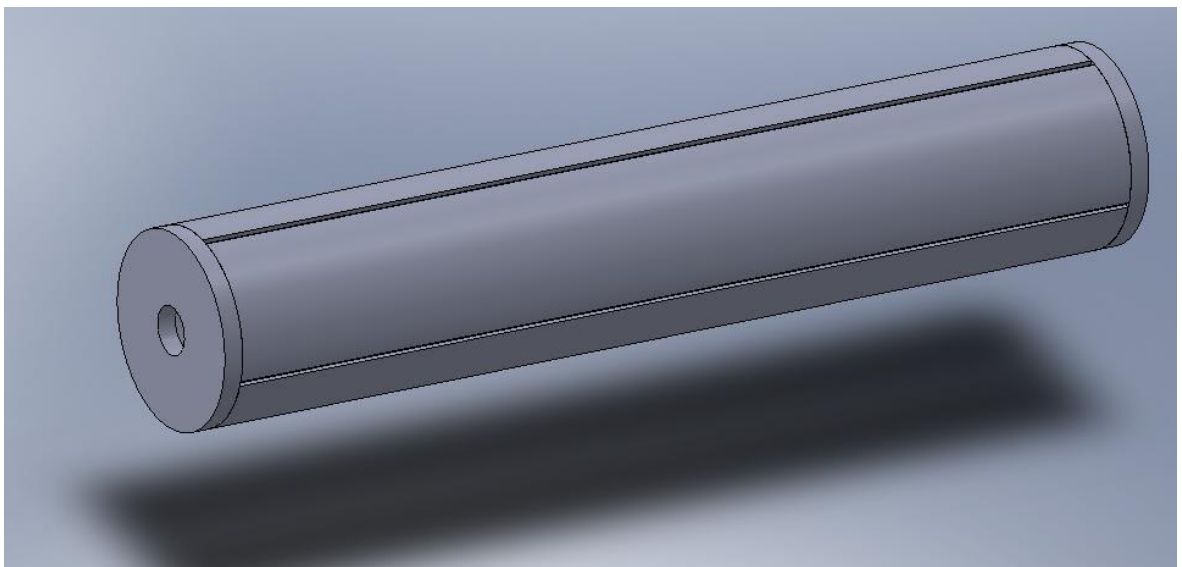


**Kuva 7.** Jako useaan samankokoiseen moduuliin säteissuunnassa.

Toisessa konseptissa, kuvat 8 ja 9, näkyy idea, jossa rumpu on jaettu osiin aksiaalisuunnassa, eli kyseessä on ns. sektorirakenne. Rumpu on jaettu neljään yhtä suureen sektoriin. Kyseisen mallin toteuttaminen helpottaisi osittain asennusta, mutta esimerkiksi suoraan työkohteeseen asentaminen toisi edelleen joitakin rajoitteita. Teollisuuden rumpumaiset prosessilaitteet ovat usein hyvin pitkiä aksiaalisuunnassa, monet jopa 10 metrisiä. Näin ollen kaikkein suurimpien prosessilaitteiden moduuliosien asentaminen ja kasaaminen vasta työkohteessa asettaisi rajoitteita.



**Kuva 8.** Jako samankokoisiin moduuleihin aksiaalisuunnassa.



**Kuva 9.** Jako aksiaalisuunnassa.

Lisäksi tiiveys on monesti rumpumaisilla prosessilaitteilla avainasemassa, joten sen suhteen toiminta on epävarmempaa verrattuna perinteiseen umpirakenteeseen. Tiivistyksen varmistaisi parhaiten hitsaamalla sektorit yhteen, mutta tämä hankaloittaisi huomattavasti moduulien irrottamista ja esimerkiksi vaihtoa. Lisäksi hitsausmäärien lisääntyminen lisää kustannuksia, joten vaihtoehtoisia ratkaisuja liittämislle tulisi etsiä. Eräs vaihtoehto voisi olla esim. ruuviliitokset.

Modulointi usein lisää mahdollisuuksia automatisoinnille, joten täten saataisiin myös kasvatettua sarjakokoa. Sarjakoon kasvaessa saataisiin myös alennettua kokonaiskustannuksia, sillä samaa osamoduulia voitaisiin käyttää useassa eri tuotteessa/kokoonpanossa. (Parkko, 2010, s. 36.)

Seuraavassa on listattu etuja, joita modulaarisella mallilla saavutettaisiin:

- Valmistus ja asennus helpottuvat (Laitteen asentaminen suoraan työmaalle helpottuu jossain määrin).
- Paremmat mahdollisuudet automatisoinnille.
- Kuljetusmahdollisuudet paranevat, kun kokonaiset tuotteet voidaan kuljettaa osissa.
- Rummun mittojen muokkaaminen onnistuu kohteen vaatimusten mukaan ja rakenteen lopulliseen kokoon voidaan vaikuttaa myös vielä asennusvaiheessa.
- Laitteen huolto helpottuu, kun on olemassa mahdollisuus irrottaa moduuleja.
- Kustannusten aleneminen sarjakoon kasvaessa.
- Mahdollisuus kasvattaa halkaisijaa tarpeen mukaan.

### 3.4 Liittämis- ja kiinnitysmahdollisuudet

Nykyisiin umpinaiisiin rumpurakenneratkaisuihin verrattuna modulaariset ratkaisut tuovat mukanaan moduulien liittämisen- ja kiinnitysvaihtoehtojen etsimisen. Eräs varmasti toimiva ratkaisu on hitsaus, jolloin rummun tiiveyskin saataisiin varmistettua. Toisaalta hitsausliitokset tuovat mukanaan ongelmia, mikäli moduuleja on tarvetta irrottaa. Lisäksi hitsauksesta aiheutuva lämmöntuonti saattaisi aiheuttaa muodonmuutoksia ohuimmille rumpurakenteiden seinämille. Hitsaukseen rinnastettavissa oleva liitostapa on myös juottaminen, jolla saatava liitoslujuus ei aivan yllä hitsauksesta saatavan tasolle.

Eräänä vaihtoehtona moduuliosien liittämiseksi voitaisiin pitää perinteistä ruuviliitosta. Ruuviliitosten helpon asentamisen ja irrottamisen ansiosta moduulien vaihto tai irrottaminen olisi huomattavasti yksinkertaisempaa. Toisaalta tarpeellisen tiiveyden varmistaminen pelkällä ruuviliitoksella ei välttämättä onnistu. Kustannuksissa ruuviliitos voittaa hitsausmenetelmän, jo standardiruuvien halpuudenkin takia. Ruuviliitosten luotettavuuteen, kiinnipysymiseen ja myös väsymislujuuteen vaikuttaa suuresti kiristysmomentti. Kiristysmomentin tarkkuutta voi olla vaikeaa varmistaa, joten ruuviliitosten kiinnipysyvyyden kanssa joutuu olemaan tarkkana. (Wurth Elektronik)

Mahdollisia liitostapoja ovat myös akselin ja navan väliset muotosulkeiset liitostavat. Tällaisia liitoksia ovat mm. muotoillut akselit, tapit (lieriö) ja kiilat. Muotosulkeiset liitokset perustuvat siihen, ettei niissä ole navan ja akselin välillä ollenkaan tai vain hyvin pieni säteen suuntainen puristus. Momentinsiirto toteutuu kehän suuntaisen pintapaineen ja leikkausjännityksen avulla. (Blom et al, 2001, s. 93.)

#### 4 TULOSTEN TARKASTELO

Konseptien avulla pyrittiin tuomaan esille millä eri tavoilla rakennetta voitaisiin modularisoida. Työn vaiheissa huomioitiin mitä yleisiä vaatimuksia rumpurakenteille on asetettu. Näitä ovat esimerkiksi valmistus, kuljetus, asennus ja huolto.

Erilaisten rumpurakenteiden prosessilaitteiden runsaasta lukumäärästä johtuen konseptihahmotelmia päädyttiin luomaan ainoastaan kahdenlaisia. Toisessa moduuleihin jako on toteutettu säteissuunnassa ja toisessa aksiaalisuunnassa. Tämä johtui siitä, että tarkempien ja yksityiskohtaisten konseptien luominen olisi vaatinut keskittymisen vain tiettyyn yksittäiseen prosessilaitteeseen. Konseptien tarkoitus on vain tuoda karkealla tasolla ilmi kuinka moduuleihin jako tapahtuisi. Lisäksi pyrittiin kertomaan mitä hyötyjä tai haittoja kyseisen mallisilla moduuliratkaisuilla voitaisiin saada aikaan. Tarvittavien rakenteen mittojen ja levynpaksuuksien määrittäminen vaatisi tarkempia lujuuslaskelmia.

Yleisesti ottaen voidaan todeta, että modulaarisella arkkitehtuurilla rumpurakenteen valmistus helpottuu, ja kustannukset pienenevät, kun osat voidaan valmistaa yksinkertaisemmin, ilman että joudutaan työstämään yksi suuri rakenne. Moduulien avulla rumpurakenne on uudelleen muokattavissa myös jälkeinpäin, mikä luo lisämahdollisuuksia monella saralla. Lisäksi kuljetusongelmat vähenevät, kun rumpu rakenne voidaan tuoda asennuspaikalle osissa ja koota paikanpäällä.

Suuret yhtenäiset rumpurakenteet luovat usein ongelmia huollon suhteen mm. ahtaiden tilojen takia. Tarvittaessa irtoavat moduulit luovat tietynlaisen ratkaisun tähän, kun rakenteen osat ovat mahdollista irrottaa, ja näin voidaan luoda tilaa huoltotarpeille.

Lujuusominaisuuksia tarkasteltaessa voidaan todeta, että moduuleihin jaetun rakenteen lujuusominaisuudet eivät vastaa umpinaisen rakenteen lujuutta, mutta irtorakenteenkin saa kestävästi suuria kuormituksia kun liitokset toteutetaan kestäväällä ratkaisulla, kuten hitsaamalla.



Erittäin tärkeä ominaisuus rumpurakenteisille laitteille kuten esimerkiksi sellupesuri, on tiiveys, jonka toteuttaminen nyky menetelmillä hitsausta lukuun ottamatta tuo varmasti hankaluuksia. Moduulien hitsaus taas lisää kustannuksia ja vaikeuttaa huomattavasti moduuliosien mahdollista vaihtoa tai laitteen uudelleen muokkausta.

Jatkotutkimuskohteena voisi olla kehittää rumpurakenteisen prosessilaitteen rungon modulointia siten, että samaa moduulirakennetta voitaisiin hyödyntää mahdollisimman monessa eri rumpurakennetta hyödyntävässä laitteessa. Myös laskelmat lujuuksille moduulirakennetta käytettäessä tuo lisäinfoa esimerkiksi tarvittavista ainepaksuuksista ja liitännöiden vaatimuksista. Modulaarisuudella saavutettaisiin varmasti tarpeellisia etuja nykyisiin rumpuratkaisuihin verrattuna, joten jatkokehitykselle ja -tutkimukselle olisi varmasti aihetta.

## 5 YHTEENVETO

Kandidaatintyö on tehty osana ”Prosessilaitte 2015 - Kevennetyt ja älykkäät materiaaliratkaisut prosessilaitteissa” -katalyyttihanketta. Kyseisen hankkeen tavoitteena on selvittää mm. parhaimmat kohteet älykkäille materiaaliratkaisuille ja edistää suomalaista koneosaamista.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia modulaarisuuden mahdollisuuksia yleisesti rumpurakenteisissa prosessilaitteissa. Modulaarisuuden hahmottelua tehtiin konseptitasolla ja luotiin konseptit modulaarisen ajattelumallin pohjalta. Koska toimivuutta käsiteltiin yleisesti rumpurakenteisille laitteille, konseptit eivät sisällä tarkempia mittoja tai malleja.

Modulaarisuuden käsittely oli työssä keskeisessä roolissa, joten siitä oli suotavaa kertoa runsaammin ja tarkemmin. Modulaarisuutta käsiteltiin yleisesti etujen ja haittojen kannalta, vertailtiin modulaarista ja integraalista arkkitehtuuria, esitettiin modulaarisuuden vaatimuksia, perehdyttiin modulaariseen suunnitteluun sekä suunnitellun periaatteisiin. Modulaarisuutta mietittiin myös vertaamalla uusia ideamalleja nykyisiin ratkaisuihin ja niiden ongelmiin.

## LÄHTEET

Aarnio, J., 2003. Modularization by Integration: Creating Modular Concepts for Mechatronic Products. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto. 157 s. ISBN 952-15-1027-7

Blom, S. et al., 2001. Koneenelimet ja mekanismit. 5. painos. Helsinki. Edita Oyj

Christian Berner Oy. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.5.2013]. Saatavissa:  
<http://www.christianberner.fi/kuivaus-ja-jaahdytys>

Eggen Ø. Modular product development. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.5.2013 2013]. Saatavissa:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.196.7434&rep=rep1&type=pdf>

Erikstad, S. O., 2009. Modularisation in Shipbuilding and Modular Production. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 26.1.2014]. Saatavissa:  
[http://iglo-mp2020.no/publications/IGLO\\_WP2009-11\\_Modularisation.pdf](http://iglo-mp2020.no/publications/IGLO_WP2009-11_Modularisation.pdf)

Koukkunen, K., 2010. Diplomityö, Alumiiniveneen rungon modulointi robottihitsauksen tehostamiseksi. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 89s.

Schiffauerova, A. Product Design Theory and Methodology. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 30.1.2014]. Saatavissa: <http://users.encs.concordia.ca/~andrea/inse6411/Lecture9.pdf>

Tiimonen, P., 2008. Diplomityö. Komposiittirakenteiden soveltamismahdollisuudet pesureissa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 110s.

Voith. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.5.2013]. Saatavissa:  
<http://www.voith.com/en/products-services/paper/intensatwindrum-27724.htm>

Yritystele, 2012. Älykkäät materiaaliratkaisut prosessilaitteissa KOSKE selvityshanke - Savonlinnan seudun kuntayhtymä. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.3.2013]. Saatavissa: <http://julkisethankinnat.yritystele.fi/hankintailmoitus/alykkaat-materiaaliratkaisut-prosessilaitteissa-koske-selvityshanke-savonlinnan-seudun-kuntayhtyma-0>

Wurth Elektronik. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 29.5.2013]. Saatavissa: <http://www.wurthelektronik.fi/site/media/pdf/we/kuvasto/suunnitteluopas06.pdf>

Österholm, J. & Tuokko, R., 2001. Systemaattinen menetelmä tuotemodulointiin - Modular Function Deployment. MET-julkaisu nro 21/2001. Vantaa. Metalliteollisuuden kustannus Oy. 64 s. ISBN 951-817-773-2.