



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

YUKIO SAZUKA
HÖYRYNJÄÄHDYTTIMEN SUUNNITTELUN AUTOMATISOINTI
Diplomityö

Tarkastajat: professori Asko Riitahuhta, yliopistonlehtori Antti Pulkinen

Tarkastajat ja aihe hyväksytty Teknisten tieteiden tiedekunnan tiedekuntaneuvoston kokouksessa 8. Toukokuuta 2013.

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

SAZUKA, YUKIO: Höyrynjäähdyttimen suunnittelun automatisointi

Diplomityö, 55 sivua

Kesäkuu, 2013

Pääaine: Tuotantotekniikka, Tuotekehitys

Tarkastajat: professori Asko Riitahuhta, yliopistonlehtori Antti Pulkkinen

Avainsanat: modulointi, räätälöinti, tietämysjärjestelmät, tuotekonfigurointi

Projektituotteet sisältävät tyypillisesti paljon asiakaskohtaista räätälöintiä. Siitä johtuen tuotteiden suunnittelu alkaa vasta tilauksen varmistumisen jälkeen. Tämä hidastaa tuotteen tilaus-toimitusprosessin läpimenoaika ja lisää projektin epävarmuutta. Nopeutukseen projektien valmistumista ja alentaakseen kustannuksia joissain projektituotteita valmistavissa yrityksissä on siirrytty tuotekonfigurointiin. Tuotteen eri variaatiot suunnitellaan etukäteen ja asiakkaan tarpeiden perusteella valitaan tuoteyksilö, joka parhaiten täyttää asiakkaan vaatimukset. Asiakasvaatimusten yhdistämistä tuotteen ominaisuuksiin kutsutaan konfigurointiprosessiksi.

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää Metso Power Oy:n höyrynjäähdyttimen tuoterakennetta siten, että höyrynjäähdyttimen tuoteyksilöt voidaan määritellä etukäteen suunniteltuja ratkaisuja hyödyntäen. Kehitetyn tuoterakenteen pohjalta tehtiin suunnitteluautomaatti, joka lähtötietojen perusteella muodostaa tuoteyksilön 3D-mallin sekä työpiirustukset. Työllä tavoiteltiin suunnitteluun kuluvan ajan lyhenemistä ja kustannusten alentumista.

Työn alussa perehdyttiin 152:een eri projekteissa tehtyihin höyrynjäähdyttimiin. Läpikäytyjen projektien avulla kartoitettiin, mitä muutoksia eri tuoteyksilöiden välillä oli tarvittu. Muuttujista pyrittiin tunnistamaan toiminnan kannalta oleelliset ja turhat variaatiot. Vakioimalla muuttujia ja rajoittamalla valintoja muuttujien määrä saatiin putoamaan noin 30:stä alle kymmeneen.

Työn tuloksena syntyi tuoteperhe, jonka kaikki mahdolliset variaatiot ovat etukäteen suunniteltuja. Höyrynjäähdyttimen detaljisuunnitteluun kuluva aika lyheni noin 150 tunnista 30 tuntiin yhtä projektia kohden.

ABSTRACT

TAMPEREUNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

SAZUKA, YUKIO: Design Automation of Steam Attemperator

Master of Science Thesis, 55 pages

June, 2013

Major: Product Development

Examiner: Professor Asko Riitahuhta, Associate Professor Antti Pulkkinen

Keywords: customization, knowledge based systems, modulation, product configuration

In projecting business individual products are typically strongly influenced by customer needs. Therefore these products are highly customized and the designing of the products starts no earlier than after the customer order is verified. This prolongs the sales- delivery process and increases the amount of uncertainty in the project. To counter these effects companies may transform from projecting into product configuration where individual products are selected from pre-defined solutions. The benefits are lowered costs and less time needed for delivery.

The aim of this thesis was to redesign Metso Power steam attemperator so that project specific attemperators can be produced using product configuration. A design automate was made for the configuration process. The goals were to shorten time needed for designing a product specific attemperator and decrease designing costs.

152 previously made attemperators were examined and their structures were analyzed. The product variables were identified and categorized. Variables not contributing to the functionality of the product were standardized. Predefined solution spaces were created for variables crucial to the functionality of the product. Total number of variables needing definition decreased from about 30 to less than ten.

As a result the time needed for detail design of a steam attemperator dropped from about 150 hours to 30 hours. All the different product individuals are designed in advance and project specific product instance is selected using configuration process.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Metso Power Oy:lle alihankintana Entop Oy:n kautta. Työn tarkastajina toimivat professori Asko Riitahuhta sekä yliopistonlehtori Antti Pulkkinen. Työn ohjausryhmään Metso Power Oy:ltä kuuluivat Tero Heino, Pasi Lehtimäki sekä Jukka Ylitalo.

Haluan kiittää työni tarkastajia sekä ohjaajia saamistani neuvoista ja ohjeista. Erityisen kiitollinen olen saamastani mahdollisuudesta suorittaa opintoni päätökseen. Lisäksi haluan kiittää Pyry Salmea vakio-osien mallintamisesta sekä muita työn lopputulokseen vaikuttaneita henkilöitä.

Tampereella 22.kesäkuuta 2013

Yukio Sazuka

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
1.1	Taustat	1
1.2	Työn tavoitteet ja rajaukset	1
1.3	Työn rakenne ja tutkimusmenetelmät	2
2	Projektitoiminnasta systeemiseen räätälöintiin	3
2.1	Tuoterakenne	3
2.2	Modulointi	4
2.3	Projektituote	7
2.4	Systeeminen räätälöinti	9
2.5	Tuoteperhe ja tuotealusta	10
2.5.1	Modulaariset tuoteperheet	11
2.5.2	Parametriset tuoteperheet	11
2.6	Tuotekonfigurointi	12
2.7	Tietämysjärjestelmät	15
2.7.1	Suunnittelujärjestelmä	15
2.7.2	Konfiguraattorit	17
3	Taustatiedot	19
3.1	Metso Power Oy	19
3.2	Höyrykattila	20
3.3	Höyrynjäähdytin	23
3.4	Ohjelmistot ja tietojärjestelmät	26
3.4.1	SolidWorks	26
3.4.2	AutomateWorks	26
3.5	Höyrynjäähdyttimen suunnitteluprosessi	28
4	Höyrynjäähdyttimen Tuotemäärittely	29
4.1	Jäähdyttimen muuttujat	29
4.2	Ratkaisuvaihtoehdot	34
4.3	Lopullinen rakenne	37
4.4	Uusi suunnitteluprosessi	39
5	Höyrynjäähdyttimen Suunnitteluautomaatin tekeminen	41
5.1	Perusmallin tekeminen	41
5.2	Konfiguraattorin tekeminen	42
5.3	Suunnitteluautomaatin testaus ja työpiirustusten tekeminen	45
5.4	Suunnitteluautomaatin käyttö	46
6	Tulosten tarkastelu ja jatkotoimenpiteet	47
6.1	Tuotemäärittelyn arviointi	47
6.2	Vaikutukset suunnitteluprosessiin	50
6.3	Jatkotoimenpiteet	51
7	Yhteenveto	52
	Lähteet	53

Termit ja niiden määritelmät

ATO	Assemble-to-order. Tuotantostrategia, jossa asiakastilauksen jälkeen alkaa tuotteen kokoonpano.
CAD	Computer aided design. Tietokoneavusteinen suunnittelu.
CYMIC	Metso Power kiertoleijukattilan tuotenimi
ETO	Engineer-to-order. Tuotantostrategia, jossa asiakastilauksen jälkeen alkaa tuotteen suunnittelu.
HYBEX	Metso Power kerrosleijukattilan tuotenimi
KBE	Knowledge-based engineering. Tietoon perustuva suunnittelujärjestelmä, jota käytetään tuotteen suunnitteluun liittyvien ongelmien ratkaisemiseen.
KBS	Knowledge-based systems. Tietoon perustuva järjestelmät ovat tietokoneohjelmia, joita käytetään tietyn aihealueen ongelmien ratkaisemiseen.
Moduuli	Tuotteen fyysinen elementti (osa tai alikokoonpano), jolla on määritelty rajapinta. Tuotteen toiminnallisuus voidaan toteuttaa moduuleilla.
MTO	Manufacture-to-order. Tuotantostrategia, jossa asiakastilauksen jälkeen alkaa tuotteen osien valmistus.
MTS	Manufacture-to-stock. Tuotantostrategia, jossa tuotteita valmistetaan varastoon ilman asiakastilausta.
PDM	Tuotetiedon hallinta (Product data management)
RECOX	Metso Power soodakattilan tuotenimi
Systeminen räätälöinti	Projektitoiminnassa olevan yrityksen toimintastrategia, jossa täytetään asiakkaiden tarpeet tapauskohtaisesti räätälöidyillä tuotteilla taloudellisesti kannattavalla tavalla.
Tuotealusta	Tuoteperheen kaikkien tuoteyksilöiden muodostamiseen tarvittavat fyysiset elementit ja tietämys siitä, miten erilaiset tuoteyksilöt muodostetaan näistä elementeistä.
Tuotearkkitehtuuri	Kuvaa sitä, miten tuote koostuu eri osista ja osakokoonpanoista ja miten ne aikaansaavat tuotteen eri ominaisuudet.
Tuotekonfigurointi	Tuoteperheeseen kuuluvan tuoteyksilön muodostaminen etukäteen suunnitelluista ratkaisuista tiettyjen vaatimusten mukaiseksi.
Tuoteperhe	Tuotteet, jotka täyttävät tietyn perustarpeen hieman toisistaan poikkeavia ilmentymiä. Kaikki tuoteperheen tuoteyksilöt perustuvat samaan tuotealustaan.
Tuoterakenne	Kuvaa sitä, miten tuote koostuu eri osista ja osakokoonpanoista.

1 JOHDANTO

1.1 Taustat

Investointihyödykkeet, kuten esimerkiksi laitokset ja koneet, suunnitellaan ja valmistetaan usein projekteina. Investointihyödykemarkkinoilla toimivan yrityksen tuotteet sisältävät tyypillisesti suuren määrän tapauskohtaisesti asiakkaan tarpeisiin räätälöityjä ratkaisuja ja siten eri tuoteyksilöt poikkeavat toisistaan huomattavasti. Tarjouksen tekemisen tueksi tuoteyksilöä joudutaan tyypillisesti suunnittelemaan jo ennen myyntitapahtuman varmistumista. Suuresta asiakaskohtaisesta räätälöintitarpeesta johtuen tuoteyksilön detaljisuunnittelu alkaa vasta myyntitapahtuman varmistumisen jälkeen.

Kilpailukyvyn parantamiseksi projektituotteita valmistavissa yrityksissä pyritään pienentämään kustannuksia ja lyhentämään toimitusaikaa. Yhtenä keinona näiden tavoitteiden saavuttamiseen voidaan pitää systeemistä räätälöintiä, jolloin asiakaskohtaiset tarpeet toteutetaan etukäteen suunnitelluilla vakioratkaisuilla. Tämä nopeuttaa tuoteyksilökohtaista suunnittelutyötä ja tuo valmistukseen samankaltaisuutta. Systeeminen räätälöinti edellyttää ainakin osittaista tuotteen suunnittelemista ennen asiakastilauksen tapahtumista ja kyseessä on yrityksen toimintatavan muutos.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Tässä diplomityössä tutkitaan Metso Power Oy:n höyryjäähdyttimen tuoterakenteen kehittämistä siten, että se voidaan suunnitella systeemisen räätälöinnin keinoin. Tavoitteena on määrittellä höyryjäähdytin siten, että kaikki tarvittavat tuotevariantit voidaan toteuttaa etukäteen suunnitelluilla ratkaisuilla. Tällä tavoitellaan erityisesti suunnittelun nopeuttamista ja suunnittelukustannusten alentamista. Kustannussäästöjä odotetaan myös valmistuksessa.

Tuotemäärittelyn pohjalta tehdään suunnitteluautomaatti, joka muutaman syötetyn lähtötiedon perusteella kykenee ratkaisemaan, millainen tuoteyksilö tarvitaan täyttämään kyseiset vaatimukset. Suunnitteluautomaatin tuloksena syntyvät tuoteyksilön valmistus- ja kokoonpanopiirustukset sekä 3D-malli.

Työssä yrityksen toimintatavan muutosta tarkastellaan suunnittelun näkökulmasta ja tutkitaan, miten muutos toteutetaan yhteen tuoteperheeseen. Työssä ei oteta kantaa siihen, miten yrityksen toimintatavan muutos vaikuttaa muihin yritystoiminnan osaluaisiin.

1.3 Työn rakenne ja tutkimusmenetelmät

Työ koostuu seitsemästä luvusta. Luku kaksi sisältää työn soveltavan osuuden kannalta oleellisen kirjallisuustutkimuksen. Luvussa käsitellään tuoterakenteeseen ja systeemiin räätälöintiin liittyvää teoriaa sekä tuotesuunnittelun automatisointiin liittyviä tietoteknisiä ratkaisuja.

Luvussa kolme esitellään työn kohteena oleva yritys, Metso Power Oy, sekä varsinainen tuote, höyryjäähdytin. Kolmannessa luvussa kuvataan myös tuotemäärityksen ymmärtämisen kannalta oleelliset yrityksen sisäiset käytännöt ja esitellään automaatin rakentamiseen tarvittavat ohjelmistot ja tietojärjestelmät.

Neljännessä luvussa kuvataan höyryjäähdyttimen tuoterakenteen suunnittelutyö. Työ aloitettiin perehtymällä noin 150:n jäähdyttimen piirustuksiin. Piirustuksien perusteella pyrittiin höyryjäähdyttimestä löytämään oleelliset variaation kohteet. Höyryjäähdyttimen rakenteesta tehtiin ehdotuksia, joita käsiteltiin yrityksen asiantuntijoiden kanssa käydyissä palaverissa.

Viidennessä luvussa höyryjäähdyttimelle rakennetaan suunnitteluautomaatti. Kuudennessa luvussa arvioidaan tehdyn työn vaikutuksia höyryjäähdyttimen suunnitteluun. Seitsemäs luku sisältää yhteenvedon työstä.

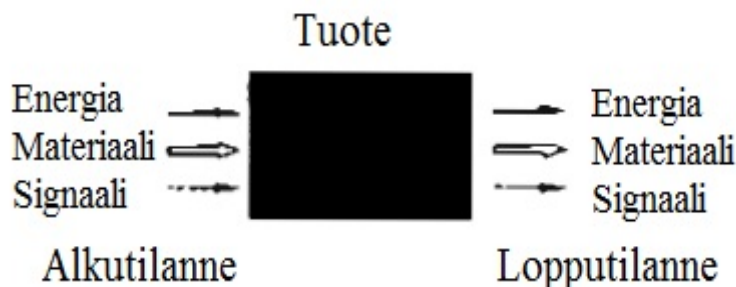
2 PROJEKTITOIMINNASTA SYSTEMISEEN RÄÄTÄLÖINTIIN

Massaräätälöinnillä (mass customization) tarkoitetaan asiakaskohtaisesti räätälöityjen tuotteiden tuottamista taloudellisesti kannattavalla tavalla. Perinteisesti massaräätälöintiä on käsitelty kirjallisuudessa suursarjatuotannon näkökulmasta, eli tilanteesta, jossa suuria sarjoja valmistava yritys pyrkii lisäämään tuotevarianttien määrää ilman merkittävää kustannusten nousua. Myös projektituotteita toimittavat yritykset voivat siirtyä massaräätälöintiin, jota Boynton ja Victor (1998) kutsuvat systeemiseksi räätälöinniksi (katso Pulkkinen 2007). Tällöin tavoitteena on tuotteen toimitusajan lyhentäminen ja kustannusten alentaminen.

Tässä luvussa esitellään tuotteisiin, tuotteiden rakenteisiin ja systeemiseen räätälöintiin liittyviä teorioita sekä tutustutaan tuotesuunnittelun automatisointiin liittyviin tietoteknisiin järjestelmiin. Työn soveltavassa osuudessa hyödynnetään tässä kappaleessa esitettyjä teorioita.

2.1 Tuoterakenne

Tuotteita voidaan kuvailla monista eri näkökulmista eri tavoin. Pahl & Beitzin (1990) mukaan tuotteet voidaan abstrahoida muutosprosessiksi. Muutosprosessi voidaan esittää mustana laatikkona sekä tulo- ja lähtösuureiden muutoksena. Nämä suureet jaetaan energiaan, materiaaliin ja signaaliin. Toimintojensa avulla tuote muuttaa jonkin lähtötilanteen halutunlaiseksi lopputilaksi. Kun tuote kuvataan mustana laatikkona, ei oteta kantaa siihen, miten tuotteen toiminnallisuus on toteutettu. Kuva 2.1. havainnollistaa tuotteen esittämistä muutosprosessin avulla. (Pahl & Beitz 1990, s.22–27.)



Kuva 2.1. Tuotteen esittäminen muutosprosessin avulla (mukaillen Pahl & Beitz 1990, s. 24).

Tuotemallilla tarkoitetaan tuotteen kuvaamista yleisesti jostakin näkökulmasta. Koska tuotteita voidaan kuvailla monista eri näkökulmista, voidaan yhteen tuotteeseen liittää useita tuotemalleja, eli kuvauksia. (Peltonen et al. 2002, s.59.)

Tuoterakenne on tuotemalli, joka kuvaa miten tuote koostuu fyysisistä elementeistä, eli eri osista ja kokoonpanoista. Tuoterakenteen tarkastelutaso vaikuttaa siihen, katso-taanko elementin koostuvan pienemmistä elementeistä vai ei. Toimintorakenne kuvaa tuotteen toimintoja eli funktioita. (Peltonen et al. 2002, s.60–69.)

Tuotearkkitehtuuri kuvaa mitä elementtejä tuote sisältää, miten nämä elementit ovat koottuina yhdeksi tuotteeksi ja miten tuotteen elementit toteuttavat tuotteen toiminnot. Siten tuotearkkitehtuuri yhdistää tuoterakenteen ja toimintorakenteen. Tuotteen toimintojen ja fyysisten elementtien välisen yhteyden perusteella tuotearkkitehtuurit voidaan määritellä joko modulaarisiksi, integraalisiksi tai näiden yhdistelmäksi. Taulukko 2.1 havainnollistaa tuotteen elementtien ja toimintojen välisiä yhteyksiä. (Whitney 2004, s.348.)

Taulukko 2.1. Tuotteen toimintojen ja elementtien välinen yhteys (mukaillen Whitney 2004, s.348).

	Yksi elementti	Monta elementtiä
Yksi toiminto	Modulaarinen arkkitehtuuri	Ketjutettu arkkitehtuuri
Monta toimintoa	Integraalinen arkkitehtuuri	Ketjutettu integraalinen arkkitehtuuri

Modulaarinen arkkitehtuuri tarkoittaa tilannetta, jossa tuotteen yksi moduuli, toteuttaa yhden toiminnon. Moduuli on fyysinen elementti, jolla on määritelty rajapinta, jonka avulla moduuli kiinnittyy tuotteeseen. Moduulit ja siten myös tuotteen toiminnot ovat toisistaan riippumattomia ja tuote voidaan koota yhdistämällä tarvittavat moduulit. (Whitney 2004, s. 345.)

Jos tuotteen kaikki toiminnot on toteutettu yhdellä osalla, on kyseessä täysin integraalinen arkkitehtuuri. Valtaosa tuotteista on modulaarisen ja integraalisen arkkitehtuurin yhdistelmiä. Modulaarisella arkkitehtuurilla tavoitellaan usein tuotevariaatiota. Vakioitu rajapinta mahdollistaa eri elementtien ja siten eri toimintojen yhdistelemisen. Integraalinen arkkitehtuuri mahdollistaa modulaariseen arkkitehtuuriin verrattuna todennäköisesti suorituskykyisemmän ja teknisesti optimoidumman rakenteen. Toisaalta integraalinen arkkitehtuuri ei mahdollista tuotevariointia suunnittelun jälkeen. (Whitney 2004, s. 346–347.)

2.2 Modulointi

Kirjallisuudessa moduuleille ja modulaarisuudelle on monia erilaisia määritelmiä. Tässä yhteydessä tarkastellaan vain tuotteiden muunteluun tarkoitettua modulaarisuutta. Modulaarisuuden tavoitteena on siis erilaisten tuoteyksilöiden muodostaminen. Lehtonen

(2007) kutsuu muunteluun tähtäävää modulaarisuutta M-modulaarisuudeksi. Muuntelun lisäksi modulaarisuus voi perustua tuotannollisiin syihin, tuotteen huoltoon tai logistiin syihin. (Lehtonen 2007, s. 89).

Pahl & Beitzin (1990) mukaan moduulit voivat olla joko tuotantomoduuleita tai toiminnallisia moduuleita. Tuotantomoduulit ovat puhtaasti tuotannollisista näkökulmista suunniteltuja moduuleita. Toiminnalliset moduulit vastaavat tuotteen eri toiminnallisuuksien toteuttamisesta joko yksin tai yhdessä. (Pahl & Beitz 1990, s. 437.)

Toiminnalliset moduulit jaetaan perus-, apu-, erikois-, sovitus ja epämoduuleihin. Perusmoduulit ovat moduuleja, joita tarvitaan jokaisessa muunnelmassa eli tuotevariantissa. Apumoduulit ovat kiinnitys- ja liitoselementtejä ja ovat usein pakollisia. Erikoismoduulit ovat moduuleja, joita ei tarvita kaikissa muunnelmissa. Ne täydentävät ja laajentavat perusmoduuleilla tuotettuja perustoimintoja. Erikoismoduuleilla voidaan siis toteuttaa tuoteyksilöön lisäominaisuuksia. Sovitusmoduulit ovat vain osittain etukäteen suunniteltuja ja tarvitsevat tapauskohtaista suunnittelua. Ne voivat olla joko perus- tai erikoismoduuleita. Moduulijärjestelmän ulkopuolella toteutettavat tuotteen toiminnallisuudet toteutetaan epämoduuleilla. (Pahl & Beitz 1990, s. 436–440.)

Ulrich & Tung (1991) määrittelevät modulaarisuuden tuotteen suhteelliseksi ominaisuudeksi ja käsittelevät modulaarisuutta tuotteen toiminnallisesta näkökulmasta. Modulaarisuus riippuu sekä tuotteen fyysisen ja toiminnallisen rakenteen samankaltaisuudesta että fyysisten elementtien toiminnallisuuteen liittymättömien keskinäisten suhteiden määrästä. Fyysisen ja toiminnallisen rakenteen samankaltaisuus mahdollistaa moduulien käytön. (katso Lehtonen 2007, s. 47–49.)

Fyysisellä elementillä, eli tässä yhteydessä moduulilla, voidaan toteuttaa tuotteen ominaisuus, funktio. Moduulien riippumattomuus toisistaan mahdollistaa tuotteen ominaisuuksien valinnan toisistaan riippumatta. Ulrich & Tungen mukaan modulaarisuuden avulla voidaan tuottaa toisistaan eroavia tuoteyksilöitä siten, että samankaltaisuus tuoteyksilöiden välillä lisääntyy. (Lehtonen 2007, s. 47–49.) Edellisessä alaluvussa esitetty modulaarinen tuotearkkitehtuuri vastaa siten Ulrich & Tungen määritelmää modulaarisuudesta.

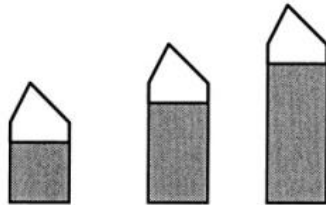
Ulrich & Tung (1991) tunnistavat kuusi modulaarisuuden muotoa. Niitä voidaan käyttää yksinään tai yhdistelmänä tuotevarianttien muodostamiseen. (katso Duray et al. 2006, s. 609.) Ne ovat esitettyinä kuvassa 2.2.

These types of modularity can be used separately or in combination to provide a customized end product.



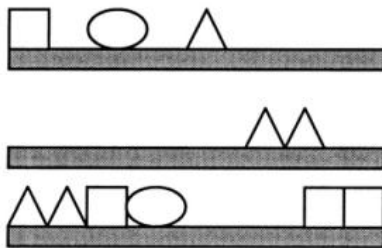
Component -sharing Modularity

Common components used in the design of a product. Products are uniquely designed around a base unit of common components
Example: Elevators



Cut-to-Fit Modularity

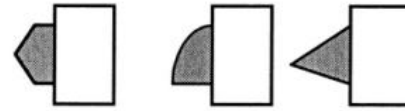
Alters the dimensions of a module before combining it with other modules. Used where products have unique dimensions such as length, width, or height. Example: eyeglasses



Bus Modularity

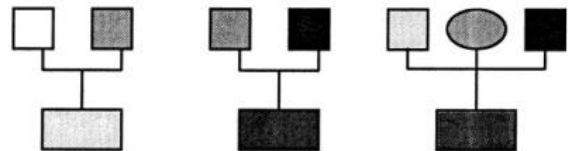
Ability to add a module to an existing series, when one or more modules are added to an existing base. Example: Track lighting

Kuva 2.2. Modulaarisuuden tyypit Ulrich & Tung (1991) mukaan (katso Duray et al. 2000, s.609).



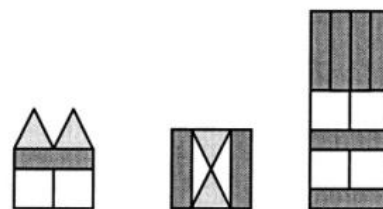
Component -swapping Modularity

Ability to switch options on a standard product. Modules are selected from a list of options to be added to a base product Example: Personal computers



Mix Modularity

Also similar to component swapping, but is distinguished by the fact that when combined, the modules lose their unique identity. Example: House paint



Sectional Modularity

Similar to component swapping, but focuses on arranging standard modules in a unique pattern. Example: Legos

Hvam et al. (2008) mukaan moduulin jakaminen (component sharing modularity) tarkoittaa saman moduulin käyttämistä eri tuoteperheissä. Moduuli toteuttaa saman toiminnallisuuden eri tuoteperheissä. (Hvam et al. 2008, s. 31.) Moduulien vaihtokelpoisuus (component swapping modularity) tarkoittaa tuoteyksilön ominaisuuksien muutta-

mista moduulia vaihtamalla. Eri moduulit mahdollistavat erilaisia tuoteominaisuuksia. Parametrinen moduuli (cut-to-fit modularity) voi skaalautua eri kokoihin. Esimerkiksi moduulin pituus tai leveys voi muuttua ja siten tuoteyksilön ominaisuudet muuttuvat. Yhdistelmämodulaarisuus (mix modularity) tarkoittaa tilannetta, jossa moduulit toisiinsa sekoittumalla muodostavat lopullisen moduulin. Moduuleja ei sekoittumisen jälkeen voi erottaa toisistaan. Väylämodulaarisuus (bus modularity) tarkoittaa tilannetta, jossa moduuleja voidaan asettaa väylän eri kohtiin tarpeen mukaan. Yhteisen rajapintatyyppin mahdollistama rakenne (sectional modularity) tarkoittaa tilannetta, jossa kaikilla moduuleilla on sama rajapinta ja moduuleita voidaan yhdistellä toisiinsa mielivaltaisesti. (Duray et al. 2000, s. 609–610; Hvam et al. 2008, s. 30–31.)

Näiden viiden päätyypin lisäksi voidaan tunnistaa kaksi erityistapausta. Ne ovat pinomodulaarisuus (stack modularity) ja valintamodulaarisuus (on-off modularity). Niitä on havainnollistettu kuvassa 2.3.



Kuva 2.3. Pinomodulaarisuus ja valintamodulaarisuus (Lehtonen 2007, s. 49).

Pinomodulaarisuus on parametrisen modulaarisuuden alatyyppejä, jossa muuntelu tapahtuu moninkertaistamalla moduulien lukumäärä. Valintamodulaarisuus on moduulien vaihtokelpoisuuden erikoistapaus. Moduuli joko valitaan tai sille varattu paikka jää tyhjäksi. (Lehtonen 2007, s. 48–49.)

Moduuli voidaan siis määritellä tuotteen osaksi, jolla on selkeästi määritelty funktio. Moduulin kiinnittyminen tuotteeseen tapahtuu määritellyn rajapinnan kautta. Rajapinta määrää miten eri moduuleita voidaan yhdistellä tuotteeseen. Tuoteyksilöt muodostetaan moduuleista yllä esitetyillä tavoilla. Tuotteessa voidaan käyttää yhtä tai useampaa modulaarisuuden tyyppiä. (Hvam et al. 2008, s.30.)

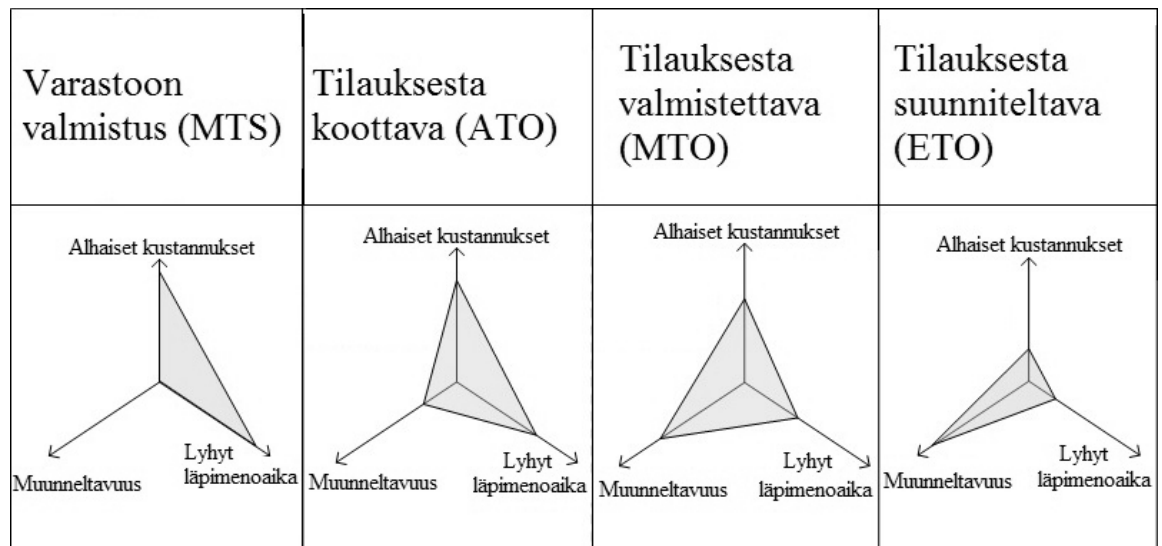
2.3 Projektituote

Yritysten tuotantojärjestelmät voidaan luokitella tuotantomäärän ja tuotteiden muuntelun perusteella. Yleensä nämä kaksi ominaisuutta ovat kytkeytyneet toisiinsa siten, että tuotantomäärän ollessa suuri, ovat tuoteyksilöiden väliset erot pieniä ja päinvastoin. Alhaisen tuotantomäärän ja korkean tuotekohtaisen muuntelun ääripäätä edustaa projektitoiminta. Projektitoiminnan tuloksena syntyviä tuotteita kutsutaan tässä työssä projektituotteiksi. Projektituotteita ovat esimerkiksi laivat ja öljynporauslautat. Projektimaisen

valmistuksen vastakohtana on suursarjatuotanto, jossa tuotteita valmistuu liukuhihnalta suuria määriä. Erot tuoteyksilöiden välillä ovat pieniä. (Scallan 2003, s. 15–16; Stevenson 2005, s.110.)

Asiakastilauksen kytkentäpisteellä tarkoitetaan sitä hetkeä tuotteen valmistusprosessissa, jossa asiakas tilaa tuotteen (Haug et al. 2007). Volyymien ja variaation sekä asiakastilauksen kytkentäpisteen perusteella voidaan tunnistaa neljä tuotantostrategiaa. Nämä strategiat ja niihin liittyvät tuotteet ovat varastoon valmistettavat (Make to stock, MTS), tilauksesta kokoonpantavat (Assemble to order, ATO), tilauksesta valmistettavat (Make to order, MTO) sekä tilauksesta suunniteltavat (Engineer to order, ETO) tuotteet. (Scallan 2003, s. 16.)

MTS strategiassa tuotteet valmistetaan arvioidun kysynnän perusteella varastoon. Asiakas ei pääse vaikuttamaan tuotteeseen lainkaan. Ostotapahtumassa asiakas valitsee valmiista tuotteista haluamansa. ATO strategiassa tuote koostuu osakoonpanoista, joita valmistetaan etukäteen varastoon. Asiakastilauksen jälkeen asiakkaan tarpeet liitetään ne parhaiten täyttäviin osakokoonpanoihin ja tuote kootaan näistä osakokoonpanoista. MTO viittaa toimintaan, jossa tuotteen valmistus alkaa vasta tilauksen jälkeen. Määritelmästä riippuen MTO saattaa sisältää myös tuotteen suunnittelua asiakkaan tarpeiden mukaan. ETO strategiassa tuotteen suunnittelu alkaa vasta tilauksen jälkeen. Asiakkaan vaikutus lopputuotteeseen on suuri. Tuotantostrategian vaikutuksia tuotteen muunteleluun, kustannuksiin ja läpimenoaikaan havainnollistaa kuva 2.4. (Caron & Fiore 1995; Scallan 2003, s. 16–19)



Kuva 2.4. Tuotteiden neljä tuotantostrategiaa (mukaiillen Skjelstad et al. 2005, s. 1568).

Projektituotteille on tunnuksenomaista monimutkainen rakenne ja suuri määrä tuoteyksilökohtaisia ratkaisuja. Asiakkaan vaatimukset ohjaavat tuoteyksilön rakennetta huomattavasti, eli tuotteessa oleva variointi on peräisin asiakkaan tarpeista (Hicks et al. 2000). Siitä johtuen projektituotteiden suunnittelu alkaa vasta asiakastilauksen jälkeen. Yllä kuvatuista tuotantostrategioista projektituotteiden valmistusta kuvaa parhaiten ETO strategia (Scallan 2003, s. 19). Projektin alussa projektille määrätään valmistumispäi-

vämäärä ja usein asiakas pitää toimitusaikaa tärkeänä ominaisuutena (Stevenson 2005, s.110; Mäkipää et al. 2012, s. 223). Asiakaskohtainen suunnittelu nostaa projektituotteiden hintaa ja pidentää projektien läpimenoaikaa (Mäkipää et al. 2012, s. 223).

2.4 Systeminen räätälöinti

Kirjallisuudessa massaräätälöinnille on useita hieman toisistaan poikkeavia määritelmiä. Yleisesti massaräätälöinti ymmärretään asiakaskohtaisesti räätälöityjen tuotteiden tuottamiseksi siten, että niiden kustannukset jäävät lähes suursarjatuotannolla tuotettavien tuotteiden tasolle. Valtaosa kirjallisuudesta tutkii massaräätälöintiä suursarjatuotannon näkökulmasta, eli kun yritys siirtyy massaräätälöintiin suursarjatuotannosta. Siksi massaräätälöinnin määritelmät painottuvat tämän tyyppiseen muutokseen yrityksen toimintatavassa. (Haug et al. 2007.)

Massaräätälöintiin voidaan siirtyä myös projektimaisesta tuotannosta. Tällöin tuotteiden hintataso harvoin putoaa suursarjatuotannolla tuotettujen muuten vastaavien tuotteiden tasolle ja tuotantovolyymit ovat alhaiset suursarjatuotantoon verrattuna. Siten edellisessä kappaleessa todettu massaräätälöinnin määritelmä täytyy. Massaräätälöinnin määritelmä voidaan kuitenkin laajentaa kattamaan myös massaräätälöintiin siirtyminen projektimaisesta tuotannosta. Asiaa voidaan tarkastella massaräätälöinnin tavoitteiden kautta. Massatuotannosta siirryttäessä tavoitteena on parempi vastaavuus asiakkaan tarpeisiin variantteja lisäämällä siten, että tuotteen hinta ei nouse. Projektituotannosta siirryttäessä tavoitteena on tuotteen kustannusten alentaminen tapauskohtaista suunnittelua vähentämällä siten, että asiakkaan yksilöllisiin vaatimuksiin pystytään edelleen vastaamaan. (Haug et al. 2007.) Projektitoiminnassa massaräätälöinti-termin sijaan voidaan käyttää termiä systeminen räätälöinti (Victor et al. 1998, katso Pulkkinen 2007).

Systemisen räätälöinnin avulla projektituotteita toimittavat yritykset pyrkivät siis alentamaan tuotteiden hintoja ja lyhentämään toimitusaikoja (Mäkipää et al. 2012, s. 223). Tämä tarkoittaa tuotteen rakenteen vakioimista ja eri tuotevarianttien suunnittelemista ainakin osittain etukäteen, eli ennen asiakastilauksen kytkentäpistettä. Asiakastilauksen jälkeen etukäteen suunnitelluista vaihtoehdoista valitaan tilaukseen parhaiten sopiva tuote. Asiakastilauksen kytkentäpiste siirtyy siten ajallisesti lähemmäs toimitusta. Edellisessä alaluvussa kuvattuihin tuotantostrategioihin viitaten yritys siirtyy ETO strategiasta MTO tai ATO strategiaan. Tilauksen jälkeen tuote vaatii vain vähän tai ei lainkaan suunnittelua ja ETO strategiaan verrattuna tuotteen valmistus tai kokoonpano voi alkaa selkeästi nopeammin. (Haug et al. 2007; Mäkipää et al. 2012, s.224–225.)

Projektituotteita ostavat asiakkaat ovat tottuneet saamaan yksilöllisiin tarpeisiinsa tarkasti räätälöityjä tuotteita (Mäkipää et al. 2012, s. 223). Siirryttäessä projektitoiminnasta vakioituun tuoterakenteeseen ja etukäteen suunniteltuihin variantteihin, ongelmaksi muodostuu etukäteissuunnittelun määrä. Liian suppeasta valikoimasta ei välttämättä löydy tuotevarianttia täyttämään yksittäisen asiakkaan tarpeet. Toisaalta kaikkien tarvittavien varianttien suunnittelu etukäteen ei välttämättä ole taloudellisesti kannattavaa, jos eri varianteista ei löydy riittävästi samankaltaisuutta. Suunniteltavien tuote-

varianttien lukumäärä kasvaa suureksi ja niiden suunnittelukustannukset kumoavat systemisen räätälöinnin tuomat edut. Siksi tuotteista tulee löytää suunnitteluvaiheessa tarpeeksi yhteisiä tekijöitä joita hyödyntämällä pidetään eri varianttien lukumäärä riittävän pienenä. (Haug et al. 2007).

2.5 Tuoteperhe ja tuotealusta

Tarjotakseen tyydyttävän määrän variantteja ja pitääkseen samalla kustannukset riittävän alhaisina, on useissa yrityksissä kehitetty tuotealustoja ja niiden pohjalta tuoteperheitä. Tässä työssä tuoteperheellä tarkoitetaan kaikkia toisiinsa liittyviä tuotteita, jotka täyttävät tietyn perustarpeen. Eri varianteilla, eli tuoteyksilöillä, täytetään perustarpeen erilaisia ilmentymiä. Tuoteyksilöillä on samankaltainen rakenne ja osittain yhteiset komponentit, mutta ne täyttävät toisistaan poikkeavia tarpeita. Tuoteperheen kaikki variantit, eli tuoteyksilöt, perustuvat samaan tuotealustaan. (Simpson et al. 2006, s. 3, 157.)

Tuotealustalla on monia erilaisia määritelmiä ja aihetta on tutkittu eri näkökulmista. Tuotealusta voidaan nähdä pelkästään fyysisinä osina joita eri tavoin yhdistelemällä saadaan erilaisia tuoteyksilöitä. Lisäksi tuotealustan käsitteeseen voidaan sisällyttää suunnitteluun sekä valmistukseen liittyvää tietoa. (Tseng & Piller 2003, s. 124; Simpson et al. 2006, s.3, 21.) Tässä yhteydessä tuotealustalla tarkoitetaan fyysisiä elementtejä sekä tietämystä, joiden avulla elementeistä voidaan muodostaa kaikki tuoteyksilöt. Kaikkien tuoteyksilöiden perustana on yhteinen runko, jota muokkaamalla ja johon lisäämällä tai siitä poistamalla osia tai kokoonpanoja voidaan muodostaa kaikki tuoteyksilöt. (Simpson et al. 2006, s. 3, 157–158.)

Tuoteperhe voidaan suunnitella joko proaktiivisesti ylhäältä alas (top-down) tai reaktiivisesti alhaalta ylös (bottom-up). Ylhäältä alas lähestymistavassa yritys suunnittelee uuden tuoteperheen alusta asti perustumaan yhteiseen tuotealustaan. Reaktiivinen lähestymistapa tarkoittaa tilannetta, jossa yritys suunnittelee ryhmän olemassa olevia tuotteita uudelleen siten, että tuotteet muodostavat tuoteperheen. Tavoitteena on löytää tuotteista yhteisiä tekijöitä ja hallita tuotteiden variointia. (Simpson et al. 2006, s. 5–6.)

Tuoteperheen ideana on löytää tuotteista mahdollisimman paljon yhteisiä tekijöitä ja samalla säilyttää riittävä variaation taso. Tuotteet koostuvat kaikille yhteisestä vakio-osasta sekä muuttuvista osista. Muuttuvilla osilla toteutetaan erot tuoteyksilöiden välillä. Tuotealustaan perustuvalla tuotekehityksellä saavutetaan monia etuja. Näitä ovat muun muassa nopeutunut tuotekehitys, vähentynyt tuotteiden monimutkaisuus sekä alhaisemmat suunnittelu- ja tuotantokustannukset. Yhteisten tekijöiden avulla voidaan saavuttaa kustannussäästöjä esimerkiksi valmistuksessa ja kokoonpanossa. Toisaalta liiallinen tuoteyksilöiden yhtenäistäminen saattaa heikentää tuoteyksilöiden suorituskykyä siten vähentäen niiden asiakkaalle tuomaa arvoa. (Simpson et al. 2006, s. 2–5, 14, 29; Lehtonen 2007, s. 93.)

Tuoteperheet voidaan suunnitella joko modulaarisiksi tai parametrisiksi. Modulaarisissa tuoteperheissä eri tuoteyksilöt syntyvät lisäämällä, korvaamalla tai poistamalla

yksittäisiä moduuleja kulloisenkin tarpeen mukaan. Tämä tarkoittaa sitä, että muutokset tuoteyksilöiden välillä saadaan aikaan moduuleilla. Parametrisessä tuoteperheessä tuoteyksilöistä löytyy geometrista samankaltaisuutta. Yhtä tai useampaa mittaa muuttamalla tuoteyksilö saadaan skaalautumaan eri kokoihin. (Simpson et al. 2006, s. 6.)

2.5.1 Modulaariset tuoteperheet

Modulaarisella tuoteperheellä tarkoitetaan tuotevarianttien muodostamista moduulien avulla. Tuoteperheen kaikki tuoteyksilöt muodostetaan valitsemalla etukäteen suunnitelluista moduuleista ne, joiden avulla tuoteyksilö kykenee toteuttamaan siltä vaaditut toiminnallisuudet. Tuoteperheeltä edellytetään siten modulaarista arkkitehtuuria. (Simpson et al. 2006, s. 6–7.) Moduulit voivat olla sisäisesti integraalisia (Tiihonen 1999, s.90)

Moduuleja suunniteltaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota moduulien rajapintojen määrittelyyn. Hyvin suunniteltu rajapinta helpottaa tuotevarianttien muodostamista, sillä moduulit ja siten tuotteen ominaisuudet ovat toisistaan riippumattomia. Hyvin suunniteltu rajapinta myös nopeuttaa tuotekehitystä, sillä rajapintaa ei tarvitse suunnitella uudestaan tuotetta kehitettäessä. (Simpson et al. 2006, s. 520, 525–526; Tiihonen 1999, s.93.) Toisaalta rajapinta saattaa hankaloittaa moduulien yhdistelemistä optimaalisesti valmistuksen näkökulmasta. Rajapinnat voivat myös kasvattaa moduulin fyysistä kokoa tai massaa, joka saattaa heikentää moduulin suorituskykyä. (Tiihonen 1999, s. 90.)

2.5.2 Parametriset tuoteperheet

Mittakaavaan perustuvassa, eli parametrisessä tuoteperheessä erot tuoteyksilöiden välillä syntyvät muuttamalla yhden tai useamman muuttujan (design variable) arvoa. Muuttajat jaetaan yhteisiin muuttujiin (common variables) ja ainutlaatuisiin muuttujiin (unique variables). Ainutlaatuinen muuttuja voi olla esimerkiksi tuotteen pituus tai leveys. Tuotteen suorituskyky muuttuu muuttujan arvon mukana ja tuote täyttää erilaisia tarpeita. Yhteiset muuttajat pysyvät muuttumattomina. Joissain yhteyksissä parametrinen muuntelu esitetään modulaarisuuden alatyypinä. (Simpson et al. 2006, s. 8, 136, 139.)

Pahl & Beitz (1990) määrittelevät tuotesarjan joukoksi tuotteita, jotka toteuttavat samaa toimintoa, jotka perustuvat samaan ratkaisuperiaatteeseen, joita valmistetaan erikokoisina ja joiden valmistusmenetelmät ovat samankaltaisia. Tuotesarja kehitetään valitsemalla yksi kokoluokka peruskehitelemäksi ja muut kokoluokat johdetaan tästä peruskehitelemästä. (Pahl & Beitz 1990, s.408.) Tuotesarjan kehittämisessä hyödynnetään yhtäläisyytlakeja. Yhtäläisyys tarkoittaa sitä, että ainakin yhden fyysikaalisen suureen suhde perus- ja johdoskehitelemän välillä pysyy samana. Esimerkiksi, jos tuotteen pituus kasvaa 10 % aina edelliseen kokoon verrattuna, on kyseessä geometrinen yhtäläisyys. Porraskerroin eli mittakaava on tässä tapauksessa 1,10. (Pahl & Beitz 1990, s. 409.)

Kokoporrastuksen valinnassa tulee huomioida kokoporrastuksen vaikutuksia niin tuotteen ominaisuuksien, valmistuksen sekä tuotteiden kysynnän ja asiakkaiden tarpeiden näkökulmista. Optimaalisin kokoporrastus löytyy vain huomioimalla nämä kaikki osa-alueet. Tiheä porrastus parantaa tuotteen kykyä vastata asiakkaan tarpeisiin ja tihe-

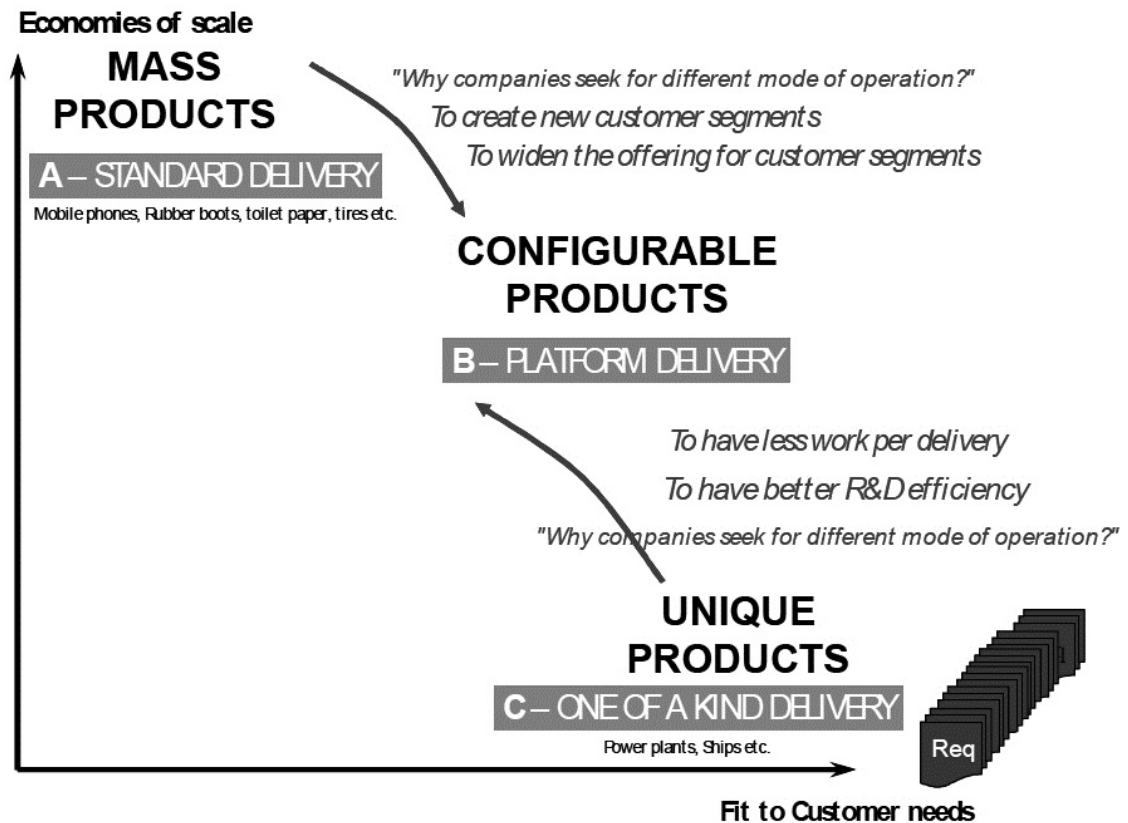
ällä porrastuksella voidaan kattaa suurempi kysyntä. Toisaalta tiheä porrastus kasvattaa tuotevarianttien lukumäärää. Tarvittaessa kokoalue voidaan muodostaa epätasaisin välein. Tällöin vakion porraskertoimen sijaan käytetään muuttuvaa porraskerrointa. (Pahl & Beitz 1990, s. 412–416.)

Parametrisen tuotealustan suunnittelussa tulee siis jakaa muuttujat yhteisiin ja ainutlaatuisiin muuttujiin. Ainutlaatuisille muuttujille valitaan muutoksen askellus eli mittakaava. Simpson (2006) esittää kirjassaan useita erilaisia optimointimenetelmiä muuttujien luokitteluun ja mittakaavan valintaan. Osa näistä optimointimenetelmistä sopii myös modulaarisen tuotealustan optimointiin. (Simpson et al. 2006, s. 133, 301.) Optimointi nähdään tuotteen suorituskyvyn ja kustannusten välisenä kompromissina. (Simpson et al. 2006, s.154.)

2.6 Tuotekonfigurointi

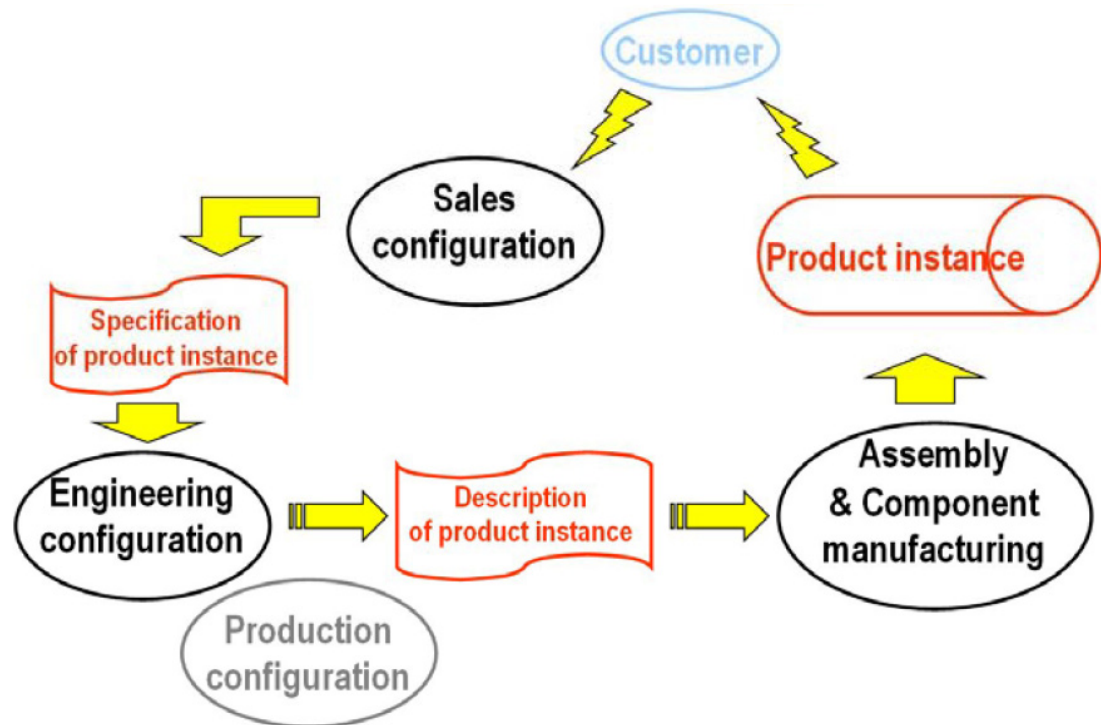
Tuotekonfigurointi tarkoittaa asiakkaan vaatimusten mukaisen tuoteyksilön määrittelymistä etukäteen suunniteltuja ratkaisuvaihtoehtoja käyttäen. Tuoteyksilöön valitaan ne moduulit ja ne parametrien arvot, jotka määrittelevät asiakkaan vaatimukset parhaiten täyttävän tuoteyksilön. Tätä toimintaa kutsutaan konfigurointiprosessiksi. Tuotekonfigurointi on siten mahdollista sekä modulaarisille että parametrisille tuoteperheille. Jos tuoteyksilö voidaan määrittellä pääsääntöisesti konfiguroimalla, mutta se sisältää myös tapauskohtaista suunnittelua, on kyseessä osittain konfiguroitava tuote. (Lehtonen 2007, s. 69–71; Tiihonen 1999, s. 12–14, 90).

Tuotekonfiguroinnin päätavoitteena on tuotevarianttien tuottaminen taloudellisesti kannattavalla tavalla. Tuotekonfigurointi on siis yksi keino toteuttaa systeemiä räätälöintiä. Siten myös tuotekonfigurointiin voidaan siirtyä joko projektituotannosta tai massatuotannosta. Tätä havainnollistaa kuva 2.5. (Lehtonen 2007, s. 72; Tiihonen 1999, s.26).



Kuva 2.5. Tuotekonfigurointiin voidaan siirtyä kahdesta suunnasta (mukailten Juuti & Lehtonen 2006, s.267).

Tuotteen tilaus-toimitusprosessin aikana konfigurointiprosessi voidaan tehdä kolmesti (Lehtonen 2007, s. 71). Kun kyseessä on hyvin yksinkertainen tuote, voidaan konfigurointiprosessi toteuttaa kerralla, eli asiakkaan tarpeet yhdistetään suoraan niihin elementteihin, joista tuote muodostuu (Peltonen et al. 2002, s.92). Muissa tapauksissa konfigurointiprosessi jakautuu osiin. Myyntikonfiguroinnissa (sales configuration) asiakkaan tarpeet yhdistetään tuotteen ominaisuuksiin. Myyntikonfiguroinnissa asiakkaan tarpeita ei vielä yhdistetä elementteihin, mutta tiedetään, että kyseinen tuoteyksilö voidaan valmistaa. Suunnittelukonfiguroinnissa (engineering configuration) tuoteyksilön ominaisuudet muunnetaan tuoteyksilön kuvaukseksi. Tämän kuvauksen perusteella tuote voidaan valmistaa. Joissain tapauksissa tuoteyksilön fyysisten elementtien valinta tapahtuu vasta tuotantokonfiguroinnissa (production configuration). Kuva 2.6 esittää konfigurointiprosessin eri vaiheita. (Peltonen et al. 2002, s. 81–85; Lehtonen 2007, s. 71–72.)



Kuva 2.6. Konfigurointiprosessi jakautuu osiin (Lehtonen 2007, s. 71).

Konfigurointiprosessi voidaan tehdä myös automaattisesti konfiguraattorihjelmalla (Lehtonen 2007, s. 70). Automaattinen konfigurointi edellyttää suunnittelutiedon tallentamista tietokoneelle siten, että asiakaskohtaiset tarpeet voidaan ohjelmallisesti muuntaa tuotteen ominaisuuksiksi. Automaattinen konfigurointi voidaan edellisessä kappaleessa kuvatun konfigurointiprosessin tavoin jakaa kolmeen osaan. (Mäkipää et al. 2012, s. 225–227.)

Projektituotannossa toimintatavan muutoksen tavoitteena on yleensä kustannusten vähentäminen ja läpimenoajan lyhentäminen. (Lehtonen 2007, s. 73.) Projektituotteen verrattua konfiguroitu tuote ei sisällä asiakaskohtaista suunnittelua, sillä tuoteperheen kaikki tuoteyksilöt ovat etukäteen suunniteltu jo tuotekehitysvaiheessa. Yritys siirtyy siis ETO toimintatavasta joko MTO tai ATO toimintatapaan, riippuen siitä, valmistetaanko fyysisiä elementtejä etukäteen varastoon vai ei. Tämä alentaa tuoteyksilön suunnittelukustannuksia, lyhentää tilaus-toimitusprosessia sekä nopeuttaa toimitusta. Asiakaskohtaisen suunnittelun puuttuminen vapauttaa suunnitteluresursseja muuhun käyttöön. Vapautunutta suunnittelukapasiteettia voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotekehityksessä. (Lehtonen 2007, s. 74.)

Asiakaskohtaisen suunnittelun puuttuminen saattaa heikentää tuotteen asiakkaalle tuomaa arvoa. Tämä tarkoittaa sitä, että täysin asiakkaan toiveiden mukaista tuoteyksilöä ei ole suunniteltu tuoteperheen tuotekehitysvaiheessa. Oleelliset asiakastarpeet tulee siis tunnistaa tuotevarianttien skaalaa suunniteltaessa. Myös myyntitavalla on merkittävä vaikutus asiakastarpeiden täyttymisen kannalta. Yritys voi joko aktiivisesti tarjota asiakkaalle eri tuotevariantteja tai antaa asiakkaan täysin vapaasti määritellä tuotteen ominaisuudet. (Lehtonen 2007, s. 73; Haug et al. 2007.)

Ennalta tehdyn suunnittelutyön ansiosta konfiguroitavat tuotteet ovat perinteisiä projektituotteita konkreettisempia. Konkreettisuus helpottaa tuotteiden kuvaamista ja hinnoittelua. Tämä selkeästi helpottaa tuotteiden myyntiä ja markkinointia. Eri tuotevarianttien selkeä esitleminen ja tarjoaminen asiakkaalle saattaa vaikuttaa asiakkaan vaatimukseen ja siten vähentää räätälöinnin tarvetta. (Lehtonen 2007, s. 73–74.)

Konfiguroitavat tuotteet tukevat vakiointia. Kun koko tuoteperhe eli konfiguroitava tuote suunnitellaan kerralla, syntyy tuotevariantteihin automaattisesti keskinäistä samankaltaisuutta. Asiakaskohtaisen suunnittelun puute lisää todennäköisyyttä, että konfiguroitavat tuotteet sisältävät projektituotteisiin verrattuna enemmän yhtäläisyyksiä. Samankaltaisuus tehostaa tuotantoa ja parantaa laatua tilaus-toimitusprosessin eri vaiheissa. (Lehtonen 2007, s. 74.)

Konfigurointi edellyttää hyvää tiedonkulkua ja hallintaa. Suunnittelutiedon tulee olla dokumentoituna tarkasti konfigurointiprosessia varten ja toimitettujen tuoteyksilöiden dokumentointi tulee olla tallennettuna tuotteen elinkaaren ajan. Tämä aiheuttaa kustannuksia eikä ole helposti hallittavissa. Toisaalta parantunut dokumenttien hallinta helpottaa erityisesti huoltotoimia. Parantunut tuotetiedon hallinta ja huoltotoiminnan laatu saattavat vaikuttaa positiivisesti yrityksen imagoon. (Lehtonen 2007, s. 75.)

2.7 Tietämysjärjestelmät

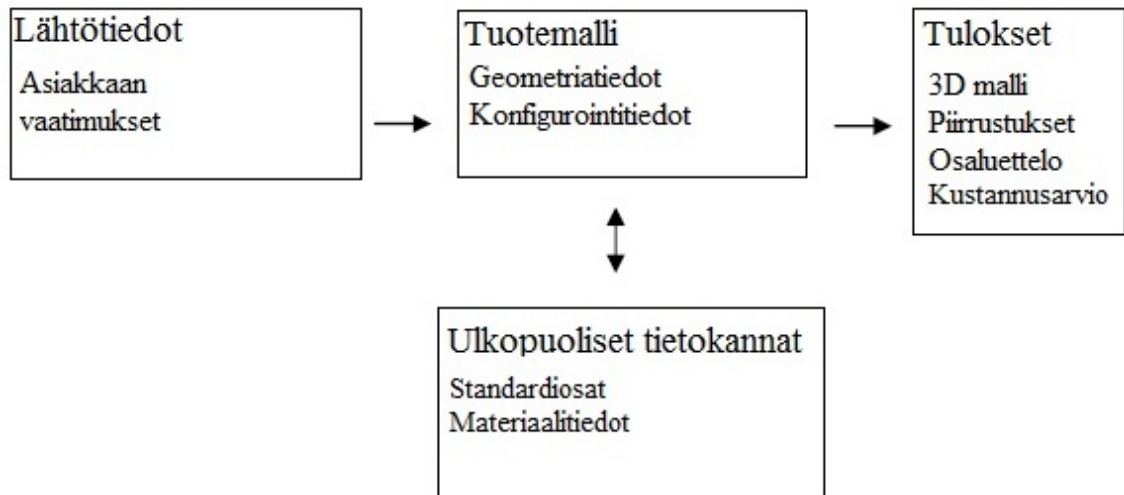
Tietämysjärjestelmät (Knowledge-based systems, KBS) ovat tietokoneohjelmia, joita käytetään tiettyyn aihealueeseen liittyvien ongelmien ratkaisemiseen. Järjestelmien perustana on tietokanta, johon on tallennettu aihealueeseen liittyvää tietoa. (Ammar-Khodja et al. 2008, s. 90.)

Ongelman lähtötietojen ja tietokannan sisällön perusteella tietämysjärjestelmä muodostaa ratkaisun ongelmaan. Tietämysjärjestelmän tarjoama ratkaisu ei saa oleellisesti erota ihmisen tekemästä ratkaisusta. Tietämysjärjestelmät nähdään hyvänä keinona tehostaa tuottavuutta. Järjestelmien ongelmat liittyvät tiedon keräämiseen ja tallentamiseen sovellettavaan muotoon. (Ammar-Khodja et al. 2008, s. 90.)

2.7.1 Suunnittelujärjestelmä

Suunnittelun tietämysjärjestelmä (Knowledge-based engineering, KBE) on tietämysjärjestelmän erikoismuoto. Siinä järjestelmään tallennetaan tuotteeseen liittyvää tietoa, kuten geometriatietoa, materiaalitietoa ja tuotteen toiminnallisuuteen liittyviä rajoitteita. Niiden lisäksi KBE järjestelmään voidaan tallentaa esimerkiksi tuotteen valmistukseen ja testaukseen liittyvää tietoa. KBE järjestelmän avulla pyritään nopeuttamaan tuotekehitystä. Yrityksen asiantuntijoilta kerätyn tietämyksen avulla KBE järjestelmää käytetään sekä rutiininomaisten suunnitteluongelmien ratkaisemiseen että monimutkaisten suunnittelutehtävien toteuttamiseen. Integroimalla KBE järjestelmä CAD järjestelmän kanssa, luodaan suunnittelun automatisointia tukeva ympäristö. (Ammar-Khodja et al. 2008, s.91.)

KBE järjestelmä on esitetty kuvassa 2.7. KBE järjestelmän perustan muodostaa tuotemalli (product model), johon tuotteeseen ja sen suunnitteluun liittyvä tietämys on tallennettu. Tämä malli sisältää esimerkiksi tuotteen CAD mallin, tiedon mahdollisista tuotevarianteista sekä valmistukseen ja kustannuksiin liittyvää tietoa. Tuotemallin ulkopuolisiin tietokantoihin tallennetaan esimerkiksi materiaalitietoa sekä standardiosia. Lähtötietoina voivat olla esimerkiksi asiakkaan vaatimukset. Lähtötietojen ja tuotemallin avulla KBE järjestelmä tuottaa tyypillisesti työpiirustuksia, osaluetteloa ja kustannusarvioita. (Sandberg 2003, s.5.)



Kuva 2.7. KBE järjestelmä (mukaillen Sandberg 2003, s.5).

Ammar-Khodja et al. (2008) nostavat esiin kaksi KBE järjestelmän luomiseen tarkoitettua menetelmää. Nämä ovat MOKA (methodology and tools oriented to knowledge-based engineering applications) ja KOMPRESSA (Knowledge-oriented methodology for the planning and rapid engineering of small-scale applications). MOKA menetelmä syntyi MOKA ESPRIT projektin tuloksena. Sen tarkoituksena oli luoda vakioidut käytännöt KBE järjestelmien luontiin ja ylläpitoon. KOMPRESSA menetelmä tähtää KBE järjestelmän luontiin tehokkaasti ja nopeasti. (Ammar-Khodja et al. s.91–92).

Molemmat menetelmät keskittyvät tiedon keräämiseen ja tiedon mallintamiseen. Ne ovatkin KBE järjestelmien kehittämisen kannalta oleelliset työvaiheet. (Ammar-Khodja s.92). KBE järjestelmään tallennettava tieto pitää kerätä asiantuntijoilta ja muuntaa tietokoneelle tallennettavaan muotoon. Tieto pitää muuntaa hyödynnettäväksi tietämykseksi. (Ammar-Khodja et al. 2008, s.94–96.)

Lähtötietojen ja tietokantaan tallennetun tietämyksen avulla KBE järjestelmä päätelee ratkaisun ongelmaan. Yleisimmät päättelytekniikat ovat sääntöihin perustuvat (rule-based), malleihin perustuvat (model-based) ja esimerkitapauksiin perustuvat (case-based) tekniikat. Sääntöihin perustuva päättely sisältää tietokannan, johon on tallennettu kaikki päättelyyn tarvittavat säännöt. Säännöt ovat ehtolauseita eli jos säännön ehto on tosi, niin säännön määräys on voimassa. Malleihin perustuva päättely jaetaan rajoitteisiin ja resursseihin perustuvaan (constraint- and resource-based) päättelyyn. Rajoitteet

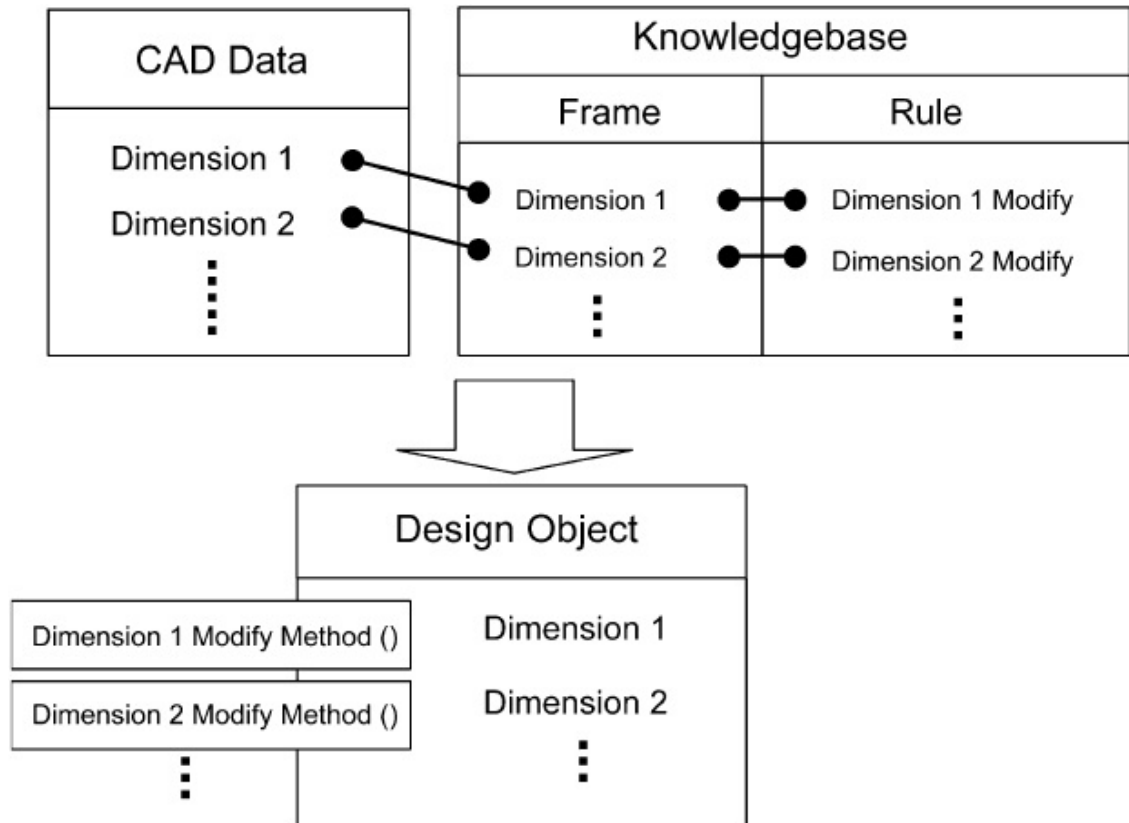
ovat yhtälöitä, jotka kuvaavat muuttujien suhdetta toisiinsa. Tällainen rajoite on esimerkiksi Newtonin peruslaki $F = ma$. Resurssipohjaisessa päättelyssä vaihtoehdot joko tuottavat tai kuluttavat jotain resurssia. Resurssia kuluttavaa vaihtoehtoa ei voi valita, jos resurssia ei ole olemassa. Esimerkkeihin perustuva päättely hyödyntää tietämystä vastaavan ongelman aiemmasta ratkaisusta. Periaatteena on se, että samankaltaiset ongelmat voidaan ratkaista toisiaan vastaavalla tavalla. (Hvam et al. 2008, s. 212–216.)

KBE järjestelmät nopeuttavat tuotekehitystä (Ammar-Khodja et al. 2008, s. 91.) Lisäksi suunnittelun automatisointi vapauttaa suunnitteluresursseja esimerkiksi innovointiin ja järjestelmän käyttö vähentää hiljaisen tiedon määrää. Osa suunnittelijoiden tietämyksestä on tallennettu järjestelmään ja siten henkilökunnan vaihtuvuus aiheuttaa vähemmän ongelmia. KBE järjestelmien haittoina voidaan pitää järjestelmän suunnittelu- ja ylläpitokustannuksia. Järjestelmän sisältämän tiedon tarkistaminen voi olla hankalaa ja tiedonkulku esimerkiksi uusille työntekijöille voi hankaloitua järjestelmän käytön takia. (Sandberg 2003, s. 11–13.)

2.7.2 Konfiguraattorit

Kappaleessa 2.6. todettiin, että konfigurointi voidaan toteuttaa automaattisesti tietokoneohjelmalla eli konfiguraattorilla. Konfiguraattorit ovat KBE järjestelmiä, jotka sisältävät tietoa tuoteperheestä ja sääntöjä tuoteyksilöiden muodostamista varten. Lähtötietojen perusteella konfiguraattori määrittelee tarpeita vastaavan tuoteyksilön. (Kovse et al. 2002). Yksinkertaisissa tapauksissa konfiguraattori voidaan rakentaa taulukkolaskentaohjelmaan. Ne soveltuvat hyvin yksinkertaisten päättelytehtävien ratkaisemiseen. (Hvam et al. 2008, s. 222–224.)

Konfiguraattorit muodostuvat usein monien eri tietokoneohjelmien yhdistelmänä. Esimerkiksi CAD järjestelmä voidaan yhdistää KBE järjestelmään. KBE järjestelmä vastaa oikeanlaisen tuoteyksilön rakenteen muodostamisesta ja CAD järjestelmä toteuttaa vastaavat työpiirustukset. (Hvam et al. 2008, s. 222–224.) Kuva 2.8 havainnollistaa CAD järjestelmän ja KBE järjestelmän yhdistelmää.



Kuva 2.8. CAD-järjestelmän ja KBE järjestelmän integraatio (Myung & Han 2001, s. 103).

Parametrinen CAD järjestelmä mahdollistaa mallien nopean muokkaamisen. Mallin mitat ohjaavat mallia eli mittoja muuttamalla mallin muoto muuttuu. (Butz et al. 2005, s. 151.) Konfiguraattorikäytössä tuotteesta tehdään perusmalli, jota konfiguraattori muokkaa. Konfiguraattori päättelee lähtötiedoista tuoteyksilön osien mitat (kuvassa 2.8 design object) ja tarvittavat osat sekä alikokoonpanot. Nämä tiedot siirretään parametriin CAD-järjestelmään, joka muokkaa tuotteen perusmallia saamansa tiedon perusteella. (Myung & Han 2001, s.105–106.)

3 TAUSTATIEDOT

Tässä luvussa esitellään yritys, johon työ on tehty ja perehdytään höyrykattilan sekä höyrynjäähdyttimen toimintaan. Luvussa 3.1 tutustutaan konserniin lukuina ja esitellään Metso Power Oy:n tuotteet lyhyesti. Luvussa 3.2 perehdytään höyrykattilan toimintaperiaatteeseen ja työn ymmärtämisen kannalta höyrykattilan tärkeimpiin komponentteihin. Luvussa 3.3 tarkastellaan työn kohteena olevan höyrynjäähdyttimen toimintaa ja esitellään Metso Power Oy:n nykyiset höyrynjäähdyttimet. Luvussa 3.4 esitellään automaatin rakentamiseen käytetyt ohjelmistot. Viimeisessä alaluvussa kuvataan yrityksessä käytössä oleva höyrynjäähdyttimen suunnitteluprosessi.

3.1 Metso Power Oy

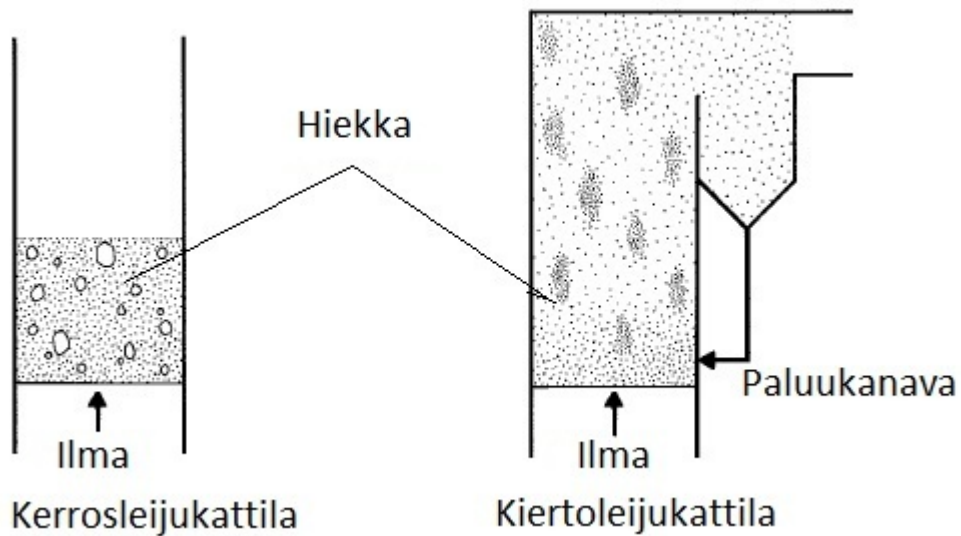
Metso Oyj toimii yli 50 maassa ja työllistää noin 30 000 henkilöä. Liikevaihto vuonna 2012 oli noin 7500 miljoonaa euroa. Metson liiketoiminta jakautuu kolmeen linjaan, kaivos ja maanrakennus, automaatio sekä massa, paperi ja voimantuotanto. (Metso 2012 – vuosiesite). Metso Power Oy kuuluu massa, paperi ja voimantuotantolinjaan. Metso Powerin liikevaihto vuonna 2011 oli 715 miljoonaa euroa ja yritys työllistää noin 1900 henkilöä. Metso Power valmistaa sooda- ja voimalaitoskattiloita paperi- ja energiateollisuudelle. Muita tuotteita ovat ympäristönsuojelulaitteet, kattiloiden kunnossapito ja muutospalvelut sekä kemikaalien käsittelylaitteistot. (Metso Power [c])

Voimalaitoskattiloita käytetään sähköenergian ja lämmön tuotantoon. Energianlähteenä niissä voidaan käyttää esimerkiksi biomassaa, kierrätyspolttoainetta tai hiiltä. Metso Power Oy:n voimalaitoskattilat ovat joko kerrosleijukattiloita (bubbling fluidized bed) tai kiertoleijukattiloita (circulating fluidized bed). Molemmissa kattilatyypeissä hyödynnetään leijupetitekniikkaa ja kumpaa tahansa kattilatyypistä voidaan kutsua yleisnimellä leijupetikattila. (Metso Power [c]; Stultz & Kitto 1992, s. 16-1–16-4).

Kerrosleijukattilassa tulipesän (furnace) alaosassa ilmavirta leijuttaa noin metrin paksuista hiekkakerrosta. Ilmavirta kohdistaa hiekkään painovoimaa suuremman nostavan voiman ja hiekan sisään muodostuu ilmakuplia. Polttoaine syötetään tulipesään hiekkakerroksen yläpuolella sijaitsevista aukoista. Osa polttoaineesta palaa jo leijukeroksen yläpuolella mutta valtaosa palamisesta tapahtuu vasta hiekkakerroksen sisällä. Kerrosleijukattilat soveltuvat vaihtelevalaatuisen biopolttoaineen polttamiseen, eikä kattila edellytä fossiilisten polttoaineiden tukipoltoa. Kerrosleijukattilan lämpötehot asettuvat välille 10–300 MW. Metso Power Oy kerrosleijukattiloita kutsutaan tuotenimellä HYBEX. (Eteläaho 2012; Stultz & Kitto 1992, s.16-1–16-3).

Kiertoleijukattilassa käytetään hienojakoisempaa hiekkää ja suurempaa leijutusilman virtausnopeutta kuin kerrosleijukattilassa. Siksi kiertoleijukattilassa hiekka ei muo-

dosta selkeää kerrosta tulipesän pohjalle, vaan hiekkaa leijailee myös tulipesän yläosassa. Kuva 3.1 havainnollistaa kerrosleiju- ja kierto-leijukattiloiden välistä eroa. (Stultz & Kitto 1992, s. 16-1).



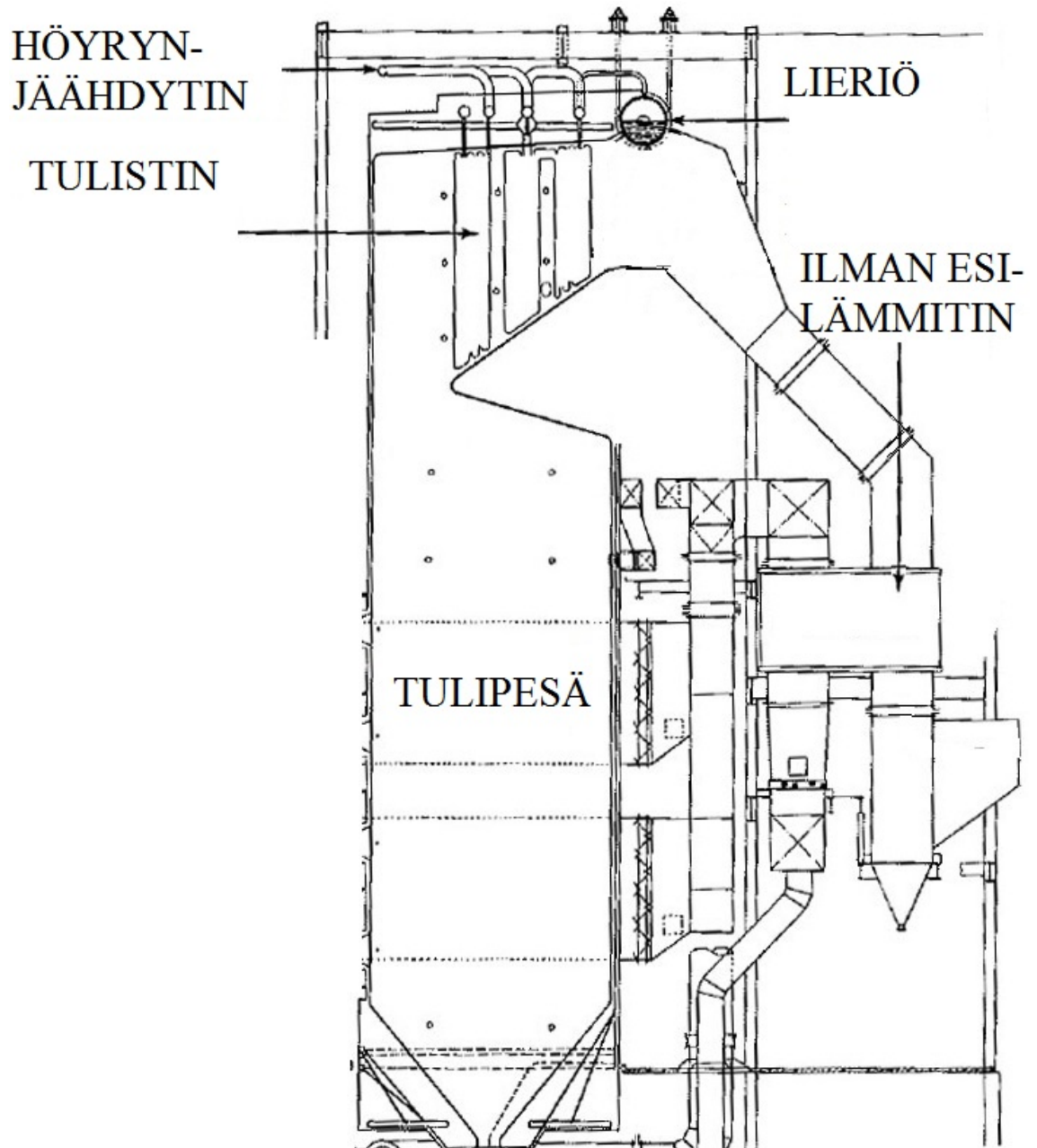
Kuva 3.1. Kerrosleijukattila ja kierto-leijukattila eroavat toisistaan hiekan leijutuksen osalta (mukaiillen Stultz & Kitto 1992, s. 16-1).

Polttoaine syötetään tulipesän alaosaan ja palaminen tapahtuu tulipesässä polttoaineen samalla noustessa hiekan mukana ylöspäin. Hiekka erotellaan savukaasusta syklonissa ja johdetaan paluukanavaa pitkin takaisin tulipesään. Kiertoleijukattiloita voidaan rakentaa noin 75–1200 MW lämpötehoille. Metso Power Oy:n kierto-leijukattiloita kutsutaan tuotenimellä CYMIC. (Luomaharju, 2012; Stultz & Kitto 1992, s. 16-1–16-3).

Soodakattilat ovat osa paperintuotantoprosessia. Soodakattilassa poltetaan selluntuotantoprosessissa syntyvää mustalipeää ja syntyvä lämpöenergia hyödynnetään sähköntuotannossa sekä paperiteollisuuden tuotantoprosessissa. Mustalipeä ruiskutetaan tulipesään pisaroivilla suuttimilla. Ruiskutettu mustalipeä putoaa tulipesän pohjalle osittain palaneena ja muodostaa tulipesän pohjalle hiiltyneen kerroksen. Ruiskusuuttimista tulevan mustalipeän pisarakoko on tärkeä tekijä soodakattilan toiminnan kannalta. Liian suuri pisarakoko huonontaa kattilan päästöarvoja ja liian pienet pisarat nousevat savukaasujen mukana. Mustalipeän orgaaninen materiaali palaa tulipesässä. Jäljelle jäävä kemikaalisula valuu pois tulipesästä jälkikäsitteilyä varten. Metso Power soodakattiloita kutsuaan RECOX kattiloiksi. (Metso Power – liiketoimintalinja; Stultz & Kitto 1992, s. 26-1–26-3).

3.2 Höyrykattila

Leijupetikattila sekä soodakattila ovat höyrykattiloita. Höyrykattila on laite, joka lämpöenergian avulla tuottaa nestemäisestä vedestä vesihöyryä. Tyypillisimpiä höyrykattilan käyttötarkoituksia ovat sähköenergian tuotanto sekä teollisuuden prosessihöyryn tuottaminen. (Stultz & Kitto, 1992, s. 1-1, 1-3.) Tämän työn ymmärtämisen kannalta oleelliset höyrykattilan komponentit ovat esitettyinä kuvassa 3.1.

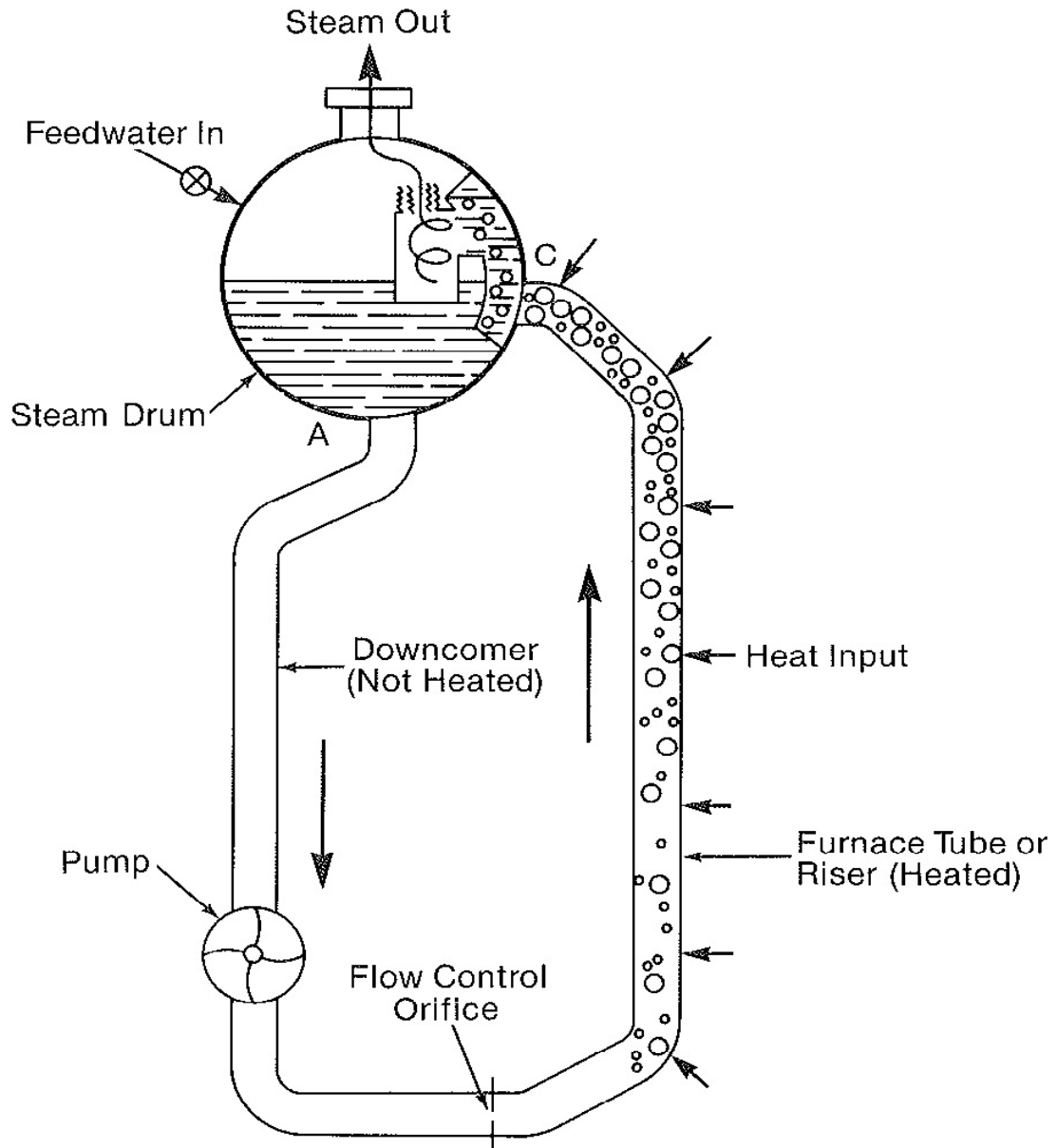


Kuva 3.1. Höyrykattilan rakenne (mukaillen Stultz & Kitto 1992, s.25-2).

Polttoaineen palaminen tapahtuu kattilan tulipesässä. Tulipesän seinät koostuvat metalliputkista ja niiden välissä olevista metallilevyistä, joita kutsutaan evälevyiksi. Palamisreaktion vapauttama polttoaineen kemiallinen energia lämmittää ja höyrystää tulipesän seinäputkissa kiertävää vettä. Syntyvä höyry on kylläistä höyryä. (Stultz & Kitto 1992, s. 1-6.)

Tulipesän yläpuolella sijaitsee lieriö (steam drum), joka on paksusta teräksestä valmistettu sylinterimäinen paineastia. Lieriön halkaisija on tyypillisesti noin 1–2 metriä ja pituus enimmillään noin 30 metriä. Tulipesän seinäputkien vesikierto alkaa ja päättyy lieriöön. Sen ensisijaisena tarkoituksena on erotella nestemäinen ja höyrymäinen vesi toisistaan tulipesän seinäputkista tulevasta kylläisestä vesi-höyryseoksesta. Tyypillisesti nestemäisen ja höyrymäisen veden erottamiseen käytetään lieriön sisällä olevia syklo-

neita. Niissä kylläinen veden ja höyryn seos joutuu pyörivään liikkeeseen ja keskipa-
koisvoima erottaa nesteen ja höyryn toisistaan. Lieriöstä höyry virtaa useiden käsittely-
vaiheiden jälkeen joko turbiinille sähköntuotantoa varten, tai teollisuuden prosessikäyt-
töön. Eroteltu vesi palaa lieriöön ja sieltä takaisin kiertoon tulipesän seinäputkiin. Pois-
tuvan vesihöyryn tilalle lieriöön johdetaan syöttövettä. Höyryn muodostumisen periaate
on esitetty kuvassa 3.2. (Stultz & Kitto 1992, s. 1-3, 1-8, 1-9, 5-12.)



Kuva 3.2. Höyryn syntyminen höyrykattilassa (Stultz & Kitto 1992, s. 1-7.)

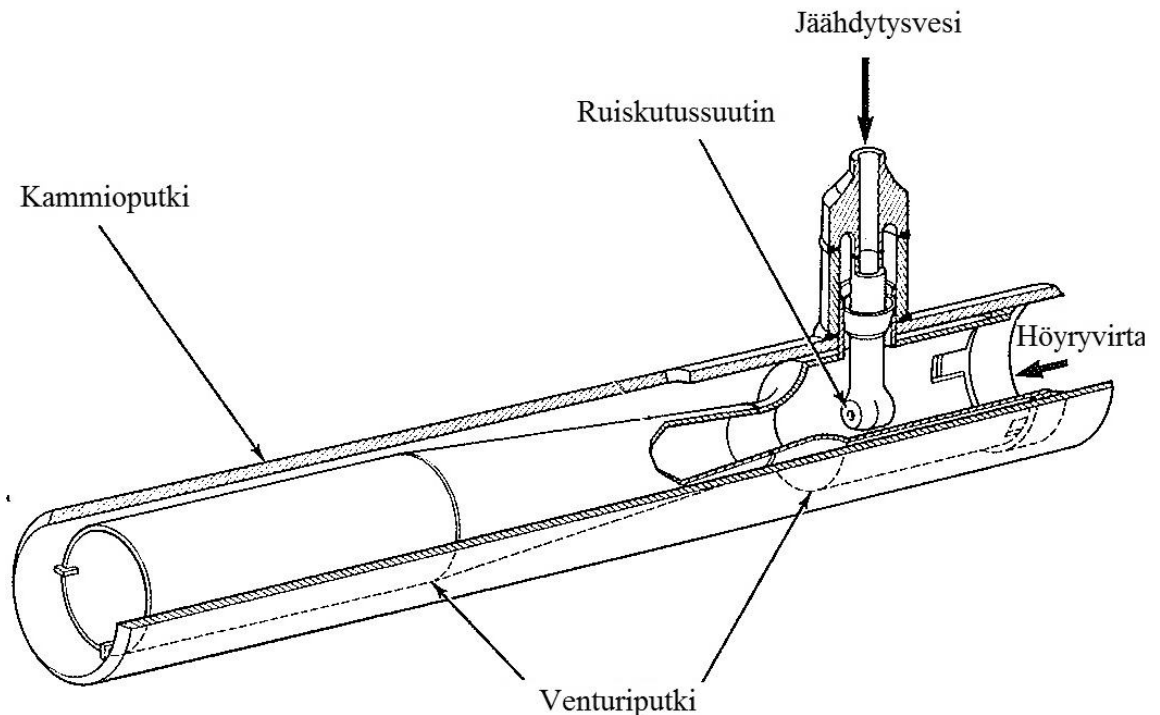
Tämän työn kannalta oleelliset höyrynkäsittelylaitteet ovat tulistin ja höyrynjäähdy-
tin. Tulistimilla nostetaan lieriöltä tulevan kylläisen höyryn lämpötilaa. Kylläisen höy-
ryn käyttäminen sähkögeneraattorin turbiinin pyörittämiseen aiheuttaisi veden konden-
soitumista turbiinilla. Kondensoitunut vesi rajoittaa turbiinin tehoa ja saattaa vaurioittaa
turbiinia. Siksi höyryn lämpötilaa nostetaan ennen turbiinille johtamista. Tulistin siirtää
lämpöenergiaa savukaasusta, jota syntyy polttoaineen palamisesta, höyryyn. Tulistettu

höyry voi luovuttaa energiaa turbiinille ilman veden tiivistymistä ja lähes kaikki tulistimen höyryyn siirtämä lämpöenergia saadaan muutettua turbiinin liike-energiaksi. Tulistimet sijaitsevat kattilan yläosassa savukaasun poistokanavassa. (Stultz & Kitto 1992, s. 18–10).

Höyryn lämpötilan tarkka säätö on turbiinin toiminnan kannalta tärkeää. Polttoaineen syöttömäärä ja tuhkan muodostuminen tulipesään ovat tärkeimmät höyryn lämpötilaan vaikuttavat tekijät. Höyryn lämpötilan hallintaan käytetään höyrynjäähdyttimiä (steam attemperator). Yhdessä kattilassa on tyypillisesti enemmän kuin yksi höyrynjäähdytin. Ne sijaitsevat yleensä höyryn virtausputkissa tulistimien väleissä ja niiden jälkeen. Höyrynjäähdyttimiä on kuvailtu tarkemmin seuraavassa kappaleessa. (Stultz & Kitto 1992, s. 18–14, 18–15.)

3.3 Höyrynjäähdytin

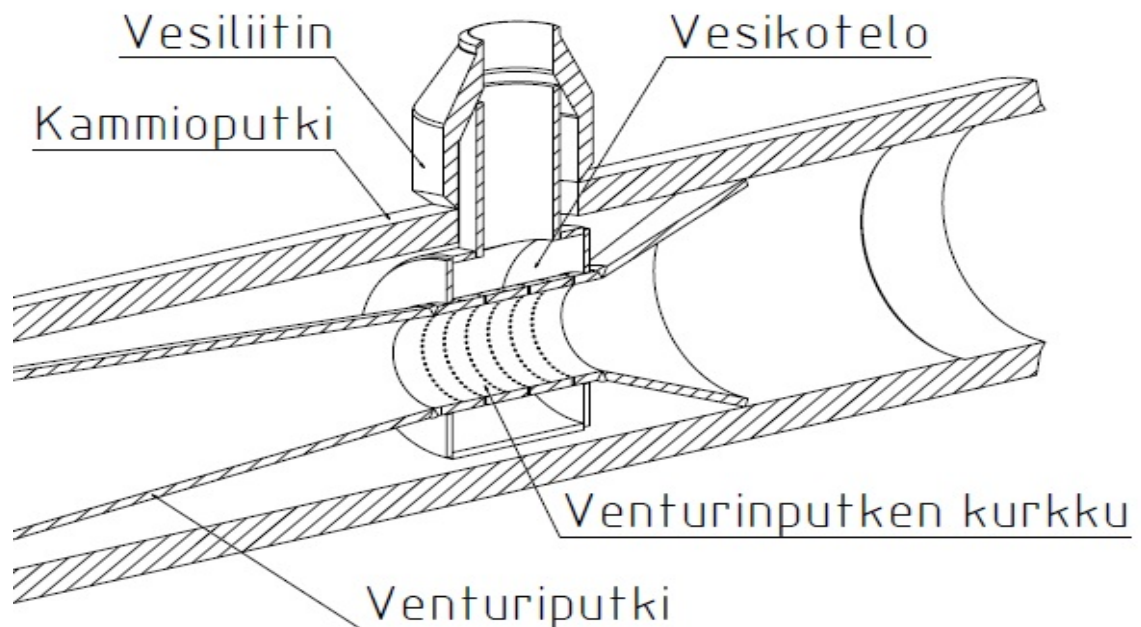
Höyrynjäähdyttimet sijaitsevat tyypillisesti tulipesän yläpuolella. Tulistimelta tuleva höyry virtaa putkia pitkin höyrynjäähdyttimeen, jossa höyryn sekaan ruiskutetaan vettä. Jäähdytysvesi höyrystyy ja sekoittuu höyryvirtaan. Veden höyrystyminen jäähdyttää höyryä. Höyryn lämpötila ennen jäähdytystä on noin 400–500 °C ja jäähdytysveden lämpötila on noin 150–200 °C voimakattiloissa ja noin 300 °C soodakattiloissa. Ruiskutettavan veden määrää voidaan säätää venttiilillä. Kuva 3.3 selventää höyrynjäähdyttimen rakennetta.



Kuva 3.3. Höyrynjäähdyttimen tärkeimmät komponentit (mukaillen Stultz & Kitto 1992, s. 18–15).

Metso Power Oy valmistaa kahta erityyppistä höyryjäähdytintä, yksireikäistä ja monireikäistä. Yksireikäinen on rakenteeltaan lähes kuvan 3.2 kaltainen. Sitä käytetään voimantuotantokattiloissa eli HYBEX ja CYMIC kattiloissa. RECOX kattiloissa on käytössä hieman tästä poikkeava monireikäinen jäähdytin. Siinä ei käytetä ruiskutusuu- tinta, vaan vesi menee vesiliittimeltä vesikoteloon, josta se johdetaan höyryn sekaan venturiputkessa olevien useiden pienten reikien läpi. Sen rakenne on esitettyä kuvassa 3.4.

Erilaisen rakenteensa ansiosta monireikäinen jäähdytin toimii yksireikäiseen jäähdyttimeen verrattuna pienemmällä jäähdytysveden paineella. HYBEX ja CYMIC katti- loissa jäähdytysvesi otetaan yleensä syöttövesilinjasta, jolloin jäähdytysveden painehä- viöllä ei ole merkitystä. RECOX kattiloissa jäähdytysvesi kondensoidaan yleensä lieri- öltä tulevasta höyrystä, jolloin jäähdytysveden ja jäähdytettävän höyryn paine-ero on pieni. Siten RECOX kattiloissa höyryjäähdyttimeltä edellytetään pientä jäähdytysve- den painehäviötä.



Kuva 3.4. Monireikäisen höyryjäähdyttimen rakenne.

Kammioputki

Kammioputki toimii höyryjäähdyttimen runkona. Höyryjäähdyttimen muut osat kiin- nittyvät välillisesti tai suoraan kammioputkeen. Kammioputki kiinnittyy päistään ulko- halkaisijoiltaan samankokoisiin höyryn virtausputkiin. Kammioputken ulkohalkaisija on tyypillisesti noin 200-500mm. ja pituus noin 3-5 metriä.

Venturiputki

Venturiputki asennetaan kammioputken sisälle, eli venturiputken ulkohalkaisija on kammioputken sisähalkaisijaa pienempi. Venturi- eli sisäputkella on kaksi päätehtävää. Yksireikäisessä jäähdyttimessä ruiskutusuu- ttimen jälkeen venturiputken poikkipinta-

ala kuristuu suurella kulmalla. Pienentyneen poikkipinta-alan takia höyryn virtausnopeus kasvaa. Suuri virtausnopeus parantaa ruiskutusveden höyrystymistä ja sekoittumista höyryyn. Venturiputken kapeinta kohtaa kutsutaan kurkuksi. Monireikäisessä jäähdyttimessä veden ruiskuttaminen tapahtuu venturiputken kurussa olevien pienten reikien kautta. Siksi monireikäisessä jäähdyttimessä on yksireikäiseen verrattuna pitempi kurku.

Kurkun jälkeen venturiputken halkaisija kasvaa vähitellen ja jatkuu sen jälkeen suorana osuutena jäähdyttimen toiseen päähän asti. Venturiputken halkaisija ennen ja jälkeen kurkun pienenee ja kasvaa aina vakiokulmalla. Siten venturiputken kurkun halkaisija sekä suoran osuuden halkaisija määräävät venturiputken supistuvan ja avartuvan osuuksien pituudet.

Venturiputken jatkuminen ruiskusuuttimen jälkeen suojaa kammioputkea mahdollisilta lämpöhokeilta, joita höyrystymätön jäähdytysvesi voisi aiheuttaa osuessaan kammioputkeen. Venturiputki kiinnittyy kammioon sovituspalojen avulla, jotka hitsataan kiinni sekä kammiotettä venturiputkeen. Venturiputken höyryn ulostulopäässä on pysäytyspalat, jotka estävät venturiputkea lähtemästä liikkeelle höyryvirran mukana.

Ruiskutussuutin ja vesiliitin

Putki, jota pitkin jäähdytysvesi tulee höyryjäähdyttimelle, hitsataan kiinni jäähdyttimen vesiliittimeen. Höyryn ja jäähdytysveden suuri lämpötilaero aiheuttaa vesiliittimeen jännitystiloja.

Yksireikäisessä jäähdyttimessä ruiskutussuutin ruiskuttaa veden höyryn sekaan. Monireikäisissä jäähdyttimissä vettä ei ruiskuteta höyryn sekaan, vaan vesi virtaa höyryyn venturiputken kurkussa olevien pienten reikien kautta. Niiden kautta virtaavan jäähdytysveden painehäviö on pienempi kuin yksireikäisessä jäähdyttimessä ruiskutussuuttimen reiän kautta ruiskutettavan veden painehäviö.

Ruiskutettavan veden laatu on tärkeää koko kattilan toiminnan kannalta. Likainen vesi aiheuttaa aineskertymiä ja siten ongelmia esimerkiksi tulistimiin ja turbiineihin. Normaalisti jäähdytysvesi otetaan kattilan syöttövesilinjasta. Mikäli sen epäillään olevan likaista, voidaan jäähdytysvesi kondensoida lieriöltä tulevasta höyrystä. Höyrynlauhdutinta kutsutaan yleensä dolezhaliksi. Dolezhalilta tulevan veden ja jäähdytettävän höyryn välinen paine-ero on pieni. Siksi monireikäisiä jäähdyttimiä on käytetty silloin, kun höyryn jäähdytysvesi on otettu dolezhalilta.

Tarkastusyhde

Joihinkin höyryjäähdyttimiin on asennettu tarkastusyhde. Se on kammioputkeen hitsattu ja päästään tulpattu putki. Tarkastusyhteen kautta voidaan höyrykattilan seisokin aikana tarkistaa höyryjäähdyttimen sisäisten osien kunto. Tarkastus tehdään joko endoskoopilla tai kameralla, riippuen tarkastusyhteen sisähalkaisijasta.

3.4 Ohjelmistot ja tietojärjestelmät

3.4.1 SolidWorks

SolidWorks on kolmiulotteiseen (3D) mekaniikkasuunnitteluun tarkoitettu ohjelmisto. Osien ja kokoonpanojen suunnittelu tapahtuu 3D-ympäristössä ja piirustukset luodaan suunnittelussa tuotettujen 3D-mallien pohjalta. 3D-malliin tehdyt muutokset päivittyvät automaattisesti piirustuksiin. Piirustuksissa muotoviivat pohjautuvat suoraan 3D-mallien muotoviivoihin.

Osien mallinnus alkaa tyypillisesti kaksiulotteisen (2D) kuvannon (sketch) piirtämisellä. 2D-kuvanto eli skitsi voidaan esimerkiksi pursottaa kolmannen ulottuvuuden suuntaan tai pyöryttää akselin ympäri ja siten muodostaa kolmiulotteinen kappale. Osan 3D-malli muodostuu erilaisia piirteitä (feature), kuten pursotuksia ja leikkauksia yhdistelemällä. Kokoonpanot tehdään yhdistelemällä osia toisiinsa. Kokoonpanoon voi sisällyttää myös muita kokoonpanoja, eli alikokoonpanoja.

Skitsiin piirrettävät muodot, kuten viivat ja ympyrät sidotaan toisiinsa mitoilla ja reaatioilla. Esimerkiksi kaksi ympyrää voi olla saman keskeisiä. Skitsien ja piirteiden mitat ovat parametrisiä, eli mittojen muuttaminen muuttaa mallin muotoa. Mittoja voidaan yhdistellä toisiinsa yhtälöillä. Kaikki malliin tehdyt skitsit ja piirteet näkyvät piirrepuussa. Skitsejä ja piirteitä voidaan muokata niiden luomisen jälkeen.

Osat ja kokoonpanot voivat sisältää konfiguraatioita. Tiihonen (1999) kutsuu lisenasiatintyössään osan tai kokoonpanon konfiguraatioita osittaiseksi konfiguroinniksi. Konfiguraatiot soveltuvat osan ja kokoonpanon eri variaatioiden esittämiseen. Esimerkiksi akselin kolme eri pituutta voidaan toteuttaa tekemällä malliin kolme konfiguraatioita. Tarvittavat mitat muutetaan konfiguraatiokohtaisiksi, ja niille asetetaan konfiguraatiokohtaiset arvot.

Metso Power Oy:llä on käytössä SolidWorks malleille tuotetiedon hallintajärjestelmä. Työn kannalta oleellisia nimikkeitä ovat projektikohtaiset osat sekä vakio-osat. Projektikohtaiset osat ovat uniikkeja jokaisessa projektissa. Niiden työpiirustukset edellyttävät aina tarkastuksen ja hyväksynnän ennen valmistukseen lähettämistä. Vakio-osat ovat osia, joiden työpiirustukset ovat etukäteen suunniteltuja, tarkastettuja sekä hyväksytyjä. Vakio-osia ei voi muuttaa mutta niissä voidaan käyttää konfiguraatioita eri variaatioiden esittämistä varten. Siten vakio-osiksi soveltuvat vain osat, jotka eivät tarvitse projektikohtaista suunnittelua. Koska vakio-osat ovat muuttumattomia ja niiden piirustukset hyväksytyjä, voidaan vakio-osien valmistus aloittaa heti, kun tiedetään, mitä vakio-osia tarvitaan.

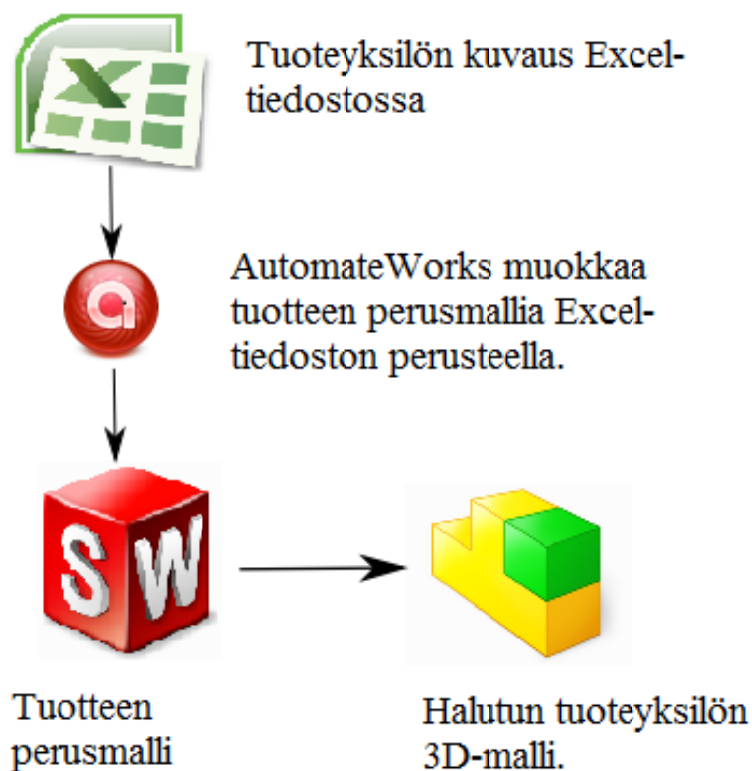
3.4.2 AutomateWorks

AutomateWorks on suomalaisen Cadworks Oy:n kehittämä tuotekonfiguraattori. Se toimii linkkinä SolidWorksin ja Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelman välillä. AutomateWorks kykenee muuttamaan SolidWorksillä mallinnettua 3D-mallia Excel-

tiedostosta löytyvän informaation perusteella. Tämä tarkoittaa esimerkiksi mallin mittojen muuttamista, osan tai kokoonpanon konfiguraation valintaa ja osien vaihtamista.

Konfiguraattorin käyttöliittymä ja tuotetiedot tallennetaan Excel-tiedostoon. Käyttäjä syöttää konfiguraattorin käyttöliittymään tarvittavat tiedot. Niiden perusteella konfiguraattoriin rakennettu logiikka päättää mitä muutoksia malli tarvitsee ja siirtää ne tuotteen malliin. Logiikan rakentamiseen voidaan käyttää kaikkia Microsoft Excelin mahdollistamia keinoja. Näitä ovat esimerkiksi ehtolauseet ja matemaattiset operaattorit.

AutomateWorksillä automatisoidut tuotteet tarvitsevat perusmallin, jota konfiguraattori muokkaa. Malli voi sisältää sekä projektikohtaisia osia että vakio-osia. Perusmallin mallinnustekniikassa tulee huomioida automatisoinnin edellyttämät erityispiirteet. Esimerkiksi kokoonpanossa osat tulee liittää toisiinsa siten, että osan vaihtaminen tai poistaminen kokoonpanosta ei riko mallin muiden osien liitoksia. Eli muut osat ovat jonkin osan poistamisen tai vaihtamisen jälkeen edelleen täysin määritettyinä tarvittavien va-pausasteiden suhteen. Kuva 3.5 havainnollistaa AutomateWorksin toimintaa.



Kuva 3.5. AutomateWorks muokkaa tuotteen perusmallia konfiguraattorista löytyvän tuoteyksilön kuvauksen perusteella.

Metso Power Oy:n tuotteista AutomateWorksillä tehtyjä tuotekonfiguraattoreita kutsutaan tässä työssä suunnitteluautomaateiksi. Termi sisältää siis sekä tuotteen perusmallin, joka on SolidWorksillä tehty 3D-malli, että konfiguraattorin, joka on yllä kuvattu Excel-tiedosto. Suunnitteluautomaatin tuloksena syntyvät osaluettelot sekä työpiirustukset. Projektikohtaisten osien työpiirustukset tarvitsevat usein muokkausta suunnitteluau-

tomaatin käyttämisen jälkeen. Koska vakio-osat ovat muuttumattomia ja niiden piirustukset hyväksytyjä, voidaan ne lähettää valmistukseen heti suunnitteluautomaatin käyttämisen jälkeen.

3.5 Höyryjäähdyttimen suunnitteluprosessi

Höyryjäähdyttimen suunnittelu alkaa prosessitietojen määrittelyllä, jonka suorittaa tuoteinsinööri. Höyrykattilan suunniteltujen kuormitustilanteiden sekä yrityksen sisäisten suunnitteluohjeiden perusteella tuoteinsinööri määrittelee jäähdyttimen prosessitiedot eli jäähdyttimen toiminnan kannalta oleellisten muuttujien arvot. Näitä ovat muun muassa jäähdyttimen kurkun halkaisija, venturiputken mitat sekä ruiskutusputtimen koko tai rei'itetyn kurkun reikien lukumäärä. Suunnitteluohjeet määrittelevät ratkaisualueet, joiden sisällä valinnat voidaan tehdä vapaasti. Lopullinen ratkaisu edellyttää tyypillisesti iterointia. Tuoteinsinöörin vastuulle kuuluvat myös esimerkiksi venturiputken halkaisijan ja pituuden määrittäminen.

Tuoteinsinöörin määrittämien arvojen perusteella projekti-insinööri suorittaa höyryjäähdyttimen detaljisuunnittelun. Siinä päätetään jäähdyttimen loput mitat ja luodaan jäähdyttimen 3D-malli ja työpiirustukset. Tässä vaiheessa suunniteltavia asioita ovat muun muassa kammioputken pituus sekä kammion päiden koneistusmitat. Detaljisuunnittelua ei ole ohjeistettu ja suunnittelun apuna käytetään yleensä vanhan projektin jäähdyttimen tietoja.

Jäähdyttimen 3D-mallin luomiseen on olemassa suunnitteluautomaatti. Nykyinen suunnitteluautomaatti edellyttää lähes kaikkien mittojen ja valintojen syöttämistä lähtötietoina. Se ei siis kykene päättämään tuotteen rakennetta. Siten nykyinen suunnitteluautomaatti pelkästään automatisoi jäähdyttimen 3D-mallin mekaanisen muokkaamisen.

Nykyinen jäähdyttimen perusmalli ei sisällä lainkaan vakio-osia, vaan pelkästään projektikohtaisia osia. Suunnitteluautomaatin tuottamat työpiirustukset vaativat siten projektikohtaista mitoitus- ja tarkastusta, hyväksynnän ennen niiden lähettämistä valmistukseen.

Suunnittelun osuus höyryjäähdyttimen kokonaiskustannuksista riippuu voimakkaasti jäähdyttimen fyysisestä koosta. Suurissa kokoluokissa valmistuskustannukset ja materiaalikulut muodostavat suurimman osan jäähdyttimen kustannuksista. Tällöin suunnittelun osuus kokonaiskustannuksista on alle 10 prosenttia. Pienissä kokoluokissa materiaalikulujen ja valmistuksen merkitys pienenee ja suunnittelu muodostaa kokonaiskustannuksista noin neljänneksen.

Detaljisuunnitteluun käytetään yhdessä projektissa noin 150 tuntia. Yhdessä projektissa on tyypillisesti noin 2–3 höyryjäähdytintä, joten yhden jäähdyttimen detaljisuunnitteluun menee noin 50–70 tuntia. Ongelmana detaljisuunnittelussa on ollut tarvittavien lähtötietojen saaminen tuoteinsinööriltä. Suurimpina syinä tähän ovat tuoteinsinöörin määrittelemien muuttujien suuri määrä ja toisaalta höyryjäähdyttimen alhainen prioriteetti.

4 HÖYRYNJÄÄHDYTTIMEN TUOTEMÄÄRITTELY

Kuten teoriaosuudessa mainittiin, systeeminen räätälöinti edellyttää tuotevarianttien suunnittelemista etukäteen. Tässä luvussa kuvataan höyrynjäähdyttimen tuoteperheen suunnittelu. Suunnittelun lähtökohtana käytettiin viimeisen kymmenen vuoden aikana tehtyjä jäähdyttimiä. Kyseessä on siis Simpsonin (2006) määritelmän mukaan reaktiivinen lähestymistapa tuoteperheen suunnitteluun (Simpson et al. 2006, s. 5).

Luku jakautuu neljään osioon. Ensimmäisessä osiossa perehdytään tuotteen muuttujiin ja kuvataan tuotemäärittelyn alkuvaiheita. Toisessa osiossa esitellään tuoteperheen suunnittelun etenemistä ja esitellään ratkaisuja, joihin eri muuttujien osalta päädyttiin. Kolmannessa alaluvussa esitellään tuoteperheen rakenne, johon lopulta päädyttiin. Viimeisessä alaluvussa kuvataan muutoksia, joita uusi tuotemäärittely tuo projektikohtaisen höyrynjäähdyttimen suunnitteluun.

4.1 Jäähdyttimen muuttujat

Jäähdyttimen tuoteperheen suunnittelu aloitettiin perehtymällä 152:een vuosina 2003–2012 tehtyihin jäähdyttimiin. Näistä 124 oli yksireikäisiä ja 28 oli monireikäisiä. Jäähdyttimien piirustuksista kerättiin päämittoja sekä prosessitietoja taulukkolaskentaohjelmaan. Tarkoituksena oli kartoittaa, minkälaisia muutoksia eri tuoteyksilöiden välillä on tarvittu.

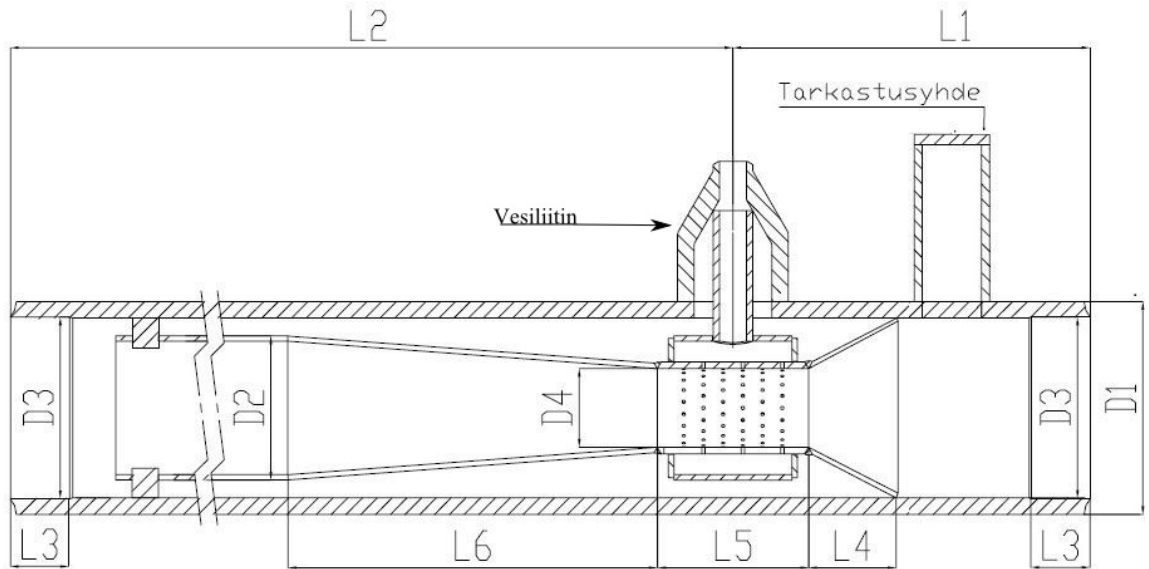
Taulukkolaskentaohjelmaan kerätyistä muuttujista etsittiin tilastollisesti merkityksellisiä korrelaatioita. Ajatuksena oli sitoa muuttujia toisiinsa ja siten vähentää tarvittavan projektikohtaisen suunnittelun määrää. Taulukoitujen muuttujien perusteella pystyi päättämään, että tuote on pääsääntöisesti parametrinen, eli skaalautuva. Kammioputken halkaisijan kasvaessa valtaosa tuotteen muistakin mitoista kasvoivat. Kammiokoon kasvaessa virtaavan höyryn määrä ja siten myös tarvittavan jäähdytysveden määrä kasvaa.

Höyrynjäähdyttimet jaettiin ryhmiin kammiokoon perusteella. Ryhmien sisällä oli muuttujien arvoissa havaittavissa projektikohtaisten prosessiarvojen erojen aiheuttamia oleellisia muutoksia. Toisaalta tietyn kammiokoon tuoteyksilöiden välillä oli havaittavissa myös tuotteen toiminnallisuuden kannalta epäoleellisia muutoksia.

Höyrynjäähdyttimen muuttujat ovat esitettynä kuvassa 4.1. Höyryn jäähdyttämisen kannalta tärkeimmät muuttujat ovat venturiputken kurkun halkaisija (D4), yksireikäisessä jäähdyttimessä ruiskutusputken reiän koko sekä monireikäisessä jäähdytintyyppissä kurkussa olevien vesireikien lukumäärä. Muita oleellisia muuttujia jäähdyttimessä ovat

kammioputken ulkohalkaisija (D1) sekä vesiliittimeen jäähdysveden tuovan putken koko.

Muita muuttujia tuotteessa ovat pituudet L1 ja L2, kammioputkien päiden kalibrointimitat (L3 ja D3) sekä venturiputken halkaisija (D2). Lisäksi tuotteessa on muutamia detaljisuunnitteluun liittyviä muuttujia, jotka ovat työn ymmärtämisen kannalta epäoleellisia ja ovat siten jätetty työn ulkopuolelle.



Kuva 4.1.

Taulukkolaskentaohjelmaan kerättyjen projektitietojen perusteella pystyi havaitsemaan, että tuoteyksilöiden välillä oli paljon muutoksia. Ilmeisen samanlaisia jäähdystarpeita oli toteutettu eri projekteissa hieman toisistaan poikkeavilla jäähdyttimillä. Pieniä muutoksia löytyi sekä jäähdysprosessin kannalta oleellisista että toisarvoisista muuttujista. Höyryjäähdyttimen muuttujat sekä niiden vaikutus tuotteen toiminnallisuuteen ovat listattuna taulukossa 4.1.

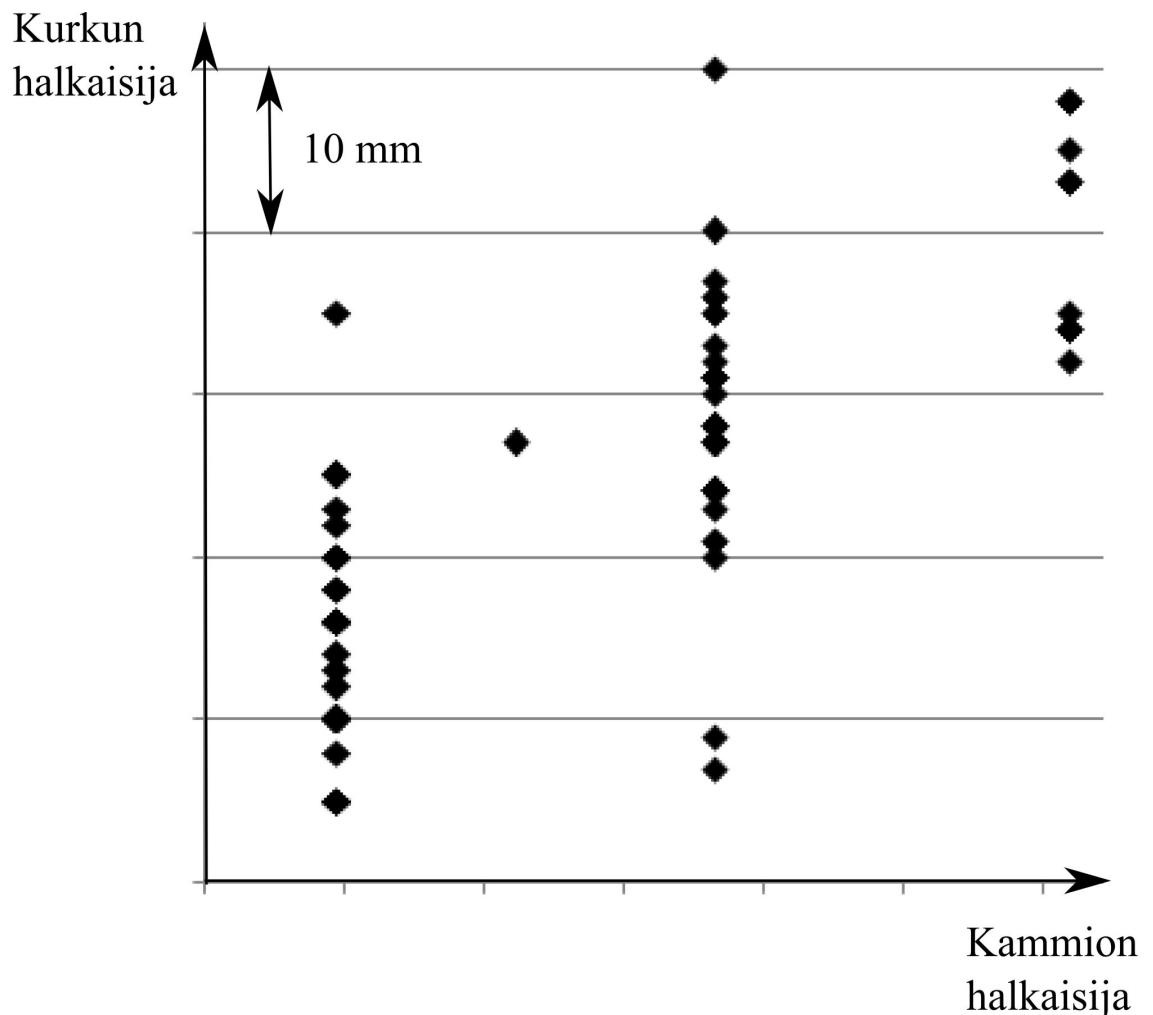
Taulukko 4.1. Höyryjäähdyttimen muuttujien vaikutus jäähdysprosessiin.

Muuttujat / Vaikutus jäähdysprosessiin	Jäähdysprosessiin vaikuttava muuttuja	Muut muuttujat
Venturiputken kurkun halkaisija	X	
Vesireikien lukumäärä / reiän koko	X	
Kammioputken koko		X
Vesiliitännän koko	X	
Mitat L1 ja L2		X
Kammioputken päiden koneistus		X
Venturiputken halkaisija D2		x

Kurkun halkaisija

Kurkun halkaisija valitaan tarvittavan höyryn virtausnopeuden mukaan. Suunnitteluohje määrää kurkun halkaisijan minimi- ja maksimi-arvot venturiputken suoran osuuden halkaisijan perusteella (Metso Power [a]). Näiden osien poikkileikkauksien pinta-alasuhteen tulee olla tiettyjen raja-arvojen sisällä. Tuoteinsinööri valitsee kurkun halkaisijan suunnitteluohjeen antaman vaihteluvälin sisältä höyrykattilan kuormitustilanteiden, eli höyryn virtauksen minimi- ja maksimimäärän mukaan. Suurimmalla kuormituksella höyryn virtausnopeus ei saa kasvaa tiettyä rajaa suuremmaksi. Toisaalta pienimmällä mahdollisella höyryn virtauksella tarvitaan riittävän suuri virtausnopeus kurkun kohdalla.

Taulukoiduista projektitiedoista havaittiin, että kurkun halkaisijaa oli säädetty tapauskohtaisesti todella tarkasti. Halkaisija oli siis optimoitu jokaisen jäähdyttimen kohdalla mahdollisimman hyvin prosessin näkökulmasta. Tätä havainnollistaa kuva 4.2.



Kuva 4.2. Kurkun halkaisijan valinnassa on projekteissa käytetty tiheää kokoporrastusta.

Veden ruiskutusreiät

Vesireikien lukumäärä tai koko, riippuen jäähdytintyyppistä, valitaan suurimman mahdollisen jäähdytysveden määrän mukaan. Yksireikäisen jäähdyttimen suunnitteluohje määrää vesireiän halkaisijan vaihteluvälin suuttimen sisähalkaisijan ja veden painehäviön avulla (Metso Power [a]). Valinta alueen sisällä tapahtuu höyrykattilan eri kuormitustilanteiden mukaan. Kuormitus tarkoittaa virtaavan höyryn määrää eri käyttötilanteissa.

Monireikäisessä jäähdyttimessä vesireiät ovat venturiputken kurkussa. Reiät ovat tyypillisesti useassa rivissä. Suunnitteluohje määrää reikien maksimimäärän riviä kohden sekä reikien kokonaislukumäärän (Metso Power [a]). Kurkun pituus määräytyy reikärivien lukumäärän mukaan. Tuoteinsinööri on voinut valita haluamansa reikämäärän riviä kohden ja siten myös vaikuttaa reikärivien lukumäärään ja kurkun pituuteen. Myös reikien halkaisija on ollut valittavissa.

Vesireiän koko tai reikien lukumäärä ei havaittu korreloivan selkeästi jäähdyttimen muiden muuttujien kanssa. Projektikohtaiset kuormitustiedot vaikuttavat reikien määrittämiseen ja suunnitteluohjeen määräämä alue on suuri, joten korrelaatiota muihin muuttujiin ei pääse muodostumaan.

Kammioputki ja vesiliitin

Kammioputken ulkohalkaisijan tulee olla samansuuruinen kuin jäähdyttimeen liittyvien putkien halkaisija on. Jäähdyttimen kammioputken seinämävahvuus on liittyviin putkiin verrattuna suurempi tai samansuuruinen. Vesiliitännän koko määräytyy tarvittavan jäähdytysveden määrän ja sallitun veden virtausnopeuden mukaan.

Kammioputkina oli käytetty pääasiassa standardien mukaisia putkikokoja. Yhtä ulkohalkaisijaa kohden löytyi useita seinämävahvuuksia, joten projekteissa oli käytetty useita kymmeniä erikokoisia kammioputkia. Projektitietojen perusteella vesiliitännän koko pääsääntöisesti kasvoi kammioputken ulkohalkaisijan kasvaessa. Suuri höyrymäärä edellyttää suurta määrää jäähdytysvettä.

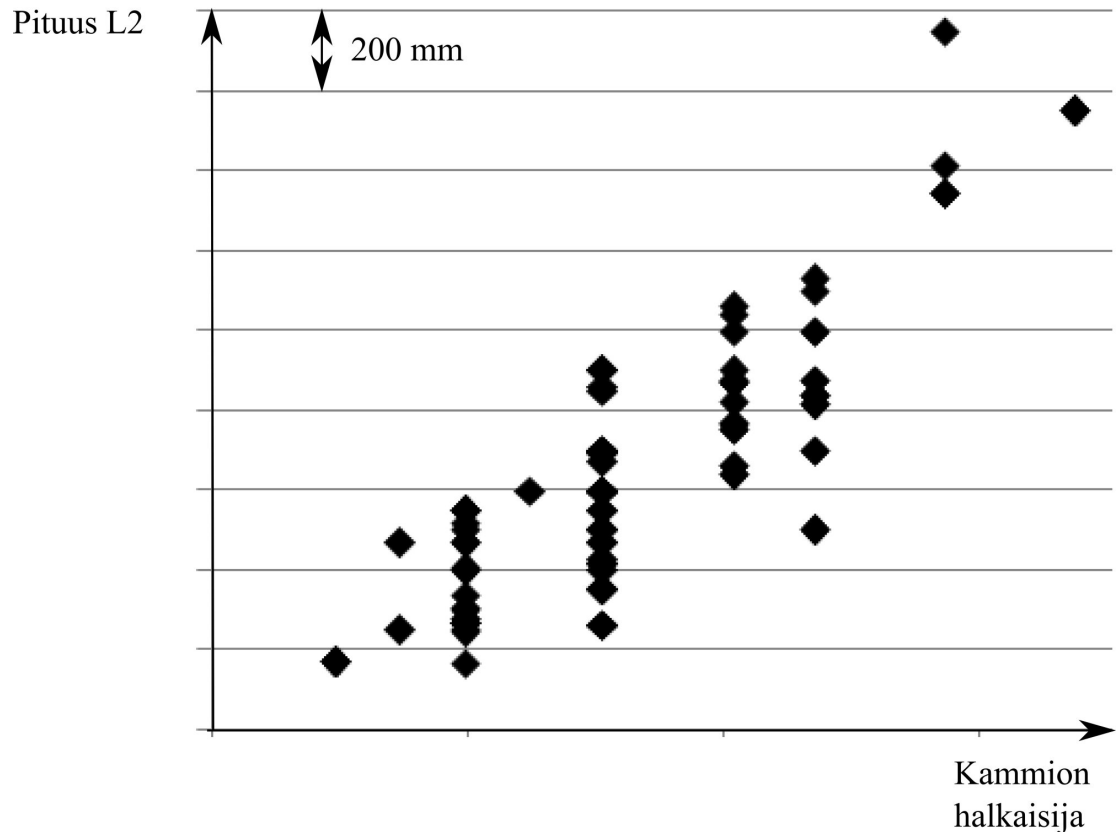
Venturiputken mitat sekä mitat L1 ja L2

Mitta L1 on merkityksellinen vain sen kannalta, että venturiputken supistuva osuus (L4) ja tarkastusyhde mahtuvat mitan L1 määräämään tilaan. Mitta L2 vaikuttaa venturiputken suoran osuuden pituuteen. Sen tulee olla riittävän pitkä, jotta riittävä määrä jäähdytysvettä ehtii höyrystyä ennen venturiputken päättymistä. Koska höyrynjäähdyttimet asennetaan vaakatasoon tulipesän yläpuolelle, tulee höyrynjäähdyttimen olla tulipesän leveyteen verrattuna lyhyempi. Tämä rajoittaa höyrynjäähdyttimen pituutta vain kaikkien pienimpien höyrykattiloiden kohdalla.

Tutkittujen projektien tiedoista nähtiin, että mitan L1 vaihtelu eri projektien välillä ei ollut sidoksissa tuotteen muihin mittoihin tai ominaisuuksiin. Mitta L2 oli selkeästi sidoksissa jäähdyttimen kammion halkaisijaan. Mitä suurempi oli kammiokoko, niin

sitä suurempi oli L2. Yhtä kammion halkaisijaa kohden oli tyypillisesti käytetty useita L2 mitan arvoja. Syytä tähän ei kyetty määrittelemään.

Kammioputken halkaisijan vaikutus mittaan L2 tulee venturiputken kautta. Venturiputken halkaisijan (D2) kasvu edellyttää myös venturiputken avartuvan osuuden pituuden kasvamista ja siten myös mitan L2 tulee kasvaa. Kuva 4.3 esittää kammion halkaisijan ja mitan L2 välistä suhdetta.



Kuva 4.3. Kammioputken halkaisijan kasvaessa kammion pituus L2 kasvaa.

Venturiputken halkaisija on valittu projekteissa tapauskohtaisesti. Valintaa ovat rajoittaneet kammioputken sisähalkaisija sekä tarvittu venturiputken kurkun halkaisija. Ohjeistusta valintaan tämän alueen sisällä ei ole.

Kammioputken päiden koneistus

Jäähdyttimen kammiot liitetään laitoksen höyryputkistoon hitsaamalla. Tyypillisesti jäähdyttimen kammioputken paksuus eroaa liittyvän putkiston paksuudesta. Liityntäpintojen läheisyydessä kammioputkien sisähalkaisija koneistetaan yhteneviksi. Myös siinä tapauksessa, jossa jäähdyttimen kammioputken sekä liittyvän putkiston nimellinen seinämävahvuus on sama, tulee kammioputkien päät koneistaa. Tämä johtuu siitä, että hitsaus edellyttää putkien päiltä valmistustoleranssia suurempaa tarkkuutta. Myös hitsausauman tarkistus edellyttää koneistusta.

Kammioputkesta koneistetaan putken sisähalkaisija (D3) tietyltä pituudelta (L3) sekä ulkopuolelta pään viiste. Päiden koneistusta liittämistä varten kutsutaan kalibroinniksi. Projekteista kerättyjen tietojen perusteella oli havaittavissa, että samankokoisissa

kammioputkissa oli usein käytetty erilaisia kalibrointimittoja eri projekteissa. Eroja oli sekä kalibrointihalkaisijassa että kalibrointipituudessa. Kalibroinnit suunniteltiin projektikohtaisesti detaljisuunnitteluvaiheessa ilman selkeää ohjeistusta.

Tarkastusyhde

Taulukoitujen tietojen perusteella oli havaittavissa, että tarkastusyhde oli asennettu suurimpaan osaan monireikäisistä jäähdyttimistä. Tarkastusyhteen halkaisija, pituus sekä asennuskohta jäähdyttimessä vaihtelivat projektikohtaisesti ilman selkeästi havaittavaa syytä. Tarkastusyhteen suunnitteluun ei löytynyt ohjeistusta.

4.2 Ratkaisuvaihtoehdot

Höyryjäähdyttimeen tutustumisen ja muuttujien kartoittamisen jälkeen alkoi varsinainen tuotemääritys. Heti tuotemäärityksen alkuvaiheessa alettiin selvittää, tarvitaanko jäähdyttimestä kahta eri versiota. Toisen jäähdytintyyppin poisjättäminen puolittaisi tuotemäärityksen ja suunnitteluautomaatin rakentamiseen tarvittavan työmäärän tämän työn osalta. Lisäksi toisesta jäähdytintyyppistä luopuminen vähentäisi jatkossa muun muassa tuotetiedon hallintaan ja tuotekehitykseen tarvittavia resursseja.

Kummankin jäähdytintyyppin osalta kysyttiin tuoteinsinööreiltä perusteluita kyseisen jäähdytintyyppin käytöstä. Selvisi, että myös RECOX kattiloissa oli aiemmin käytetty yksireikäistä jäähdytintä. Se oli vaihdettu monireikäiseen jäähdyttimeen, koska se toimii yksireikäiseen jäähdyttimeen verrattuna pienemmällä jäähdytysveden paineella. CYMIC ja HYBEX kattiloissa tällä seikalla ei ole merkitystä, sillä niissä jäähdytysvesi tulee tyypillisesti syöttövesilinjasta.

Muiden toiminnallisten erojen selvittämiseksi molempia jäähdytintyyppiejä päätettiin tutkia virtausmallinnuksen avulla. Virtausmallinnuksen perusteella molemmat jäähdyttimet toimivat jäähdytysveden painevaativuudesta lukuun ottamatta käytännössä lähes samalla tavalla. Näillä perusteilla päätettiin yrityksessä luopua yksireikäisen jäähdyttimen käytöstä ja tuoteperheen suunnittelua jatkettiin pelkästään monireikäisen jäähdyttimen osalta.

Kammioputki

Kuten todettu, kammioputkeen liittyvät muuttujat ovat kammion halkaisija, seinämävahvuus, pituus sekä kammion päiden kalibrointikoneistukset. Aiemmin nämä kaikki muuttujat ovat olleet vapaasti määritettävissä. Tuotemäärityksessä kammion ulkohalkaisijan, seinämävahvuuden sekä kalibrointimittojen osalta hyödynnettiin yrityksen sisäisiä standardeja (Heino 2011; Metso Power [b]). Niitä ei ollut aiemmin hyödynnetty höyryjäähdyttimen suunnittelussa. Standardien perusteella valittiin jäähdyttimiin hyväksyttävät kammiohalkaisijat ja seinämävahvuudet. Päiden kalibrointimitat saatiin myös suoraan standardista liittyvien höyryputkien mittojen perusteella.

Kammion pituus jakautuu mittoihin L1 ja L2. Mitat päätettiin sitoa kammion halkaisijaan, sillä kammion sisähalkaisija määrää venturiputken suoran osuuden halkaisi-

jan. Se puolestaan vaikuttaa oleellisesti venturiputken eri osien pituuksiin jotka puolestaan asettavat mitoille L1 ja L2 pienimmät mahdolliset arvot. Kammion pituus määräytyy siis kammion halkaisijan perusteella. Jäähdyttimen mitat L1 ja L2 eivät siten tarvitse projektikohtaista suunnittelua ja tietyn kammiohalkaisijan jäähdyttimet ovat aina samanmittaisia.

Venturiputki

Venturiputken halkaisija päätettiin yhdistää kammion ulkohalkaisijaan. Jokaiselle kammionkoolle valittiin suurin mahdollinen venturiputki, joka mahtui kammion sisälle riittäväällä välyksellä. Venturiputkien kokoja valittaessa hyödynnettiin sisäistä standardia (Heino 2011).

Kuten aiemmin mainittiin, venturiputken supistuvan ja avartuvan osuuksien pituudet määräytyvät venturiputken kurkun ja suoran osuuksien halkaisijoiden perusteella. Koska halkaisijaltaan samansuuruisten kammioputkien L2 mitta on aina sama, ilmenee venturiputken avarrusosan pituuden vaihtelut venturiputken suoran osuuden pituuden vaihteluna. Venturiputken suoran osuuden pää on aina yhtä etäällä kammion päästä.

Venturiputken kurkun halkaisija on jäähdytysprosessin kannalta oleellinen muuttuja. Tätä muuttujaa ei voinut sitoa tarkasti tuotteen muihin mittoihin, koska siihen vaikuttavat muut suureet ovat aina projektikohtaisia. Suunnitteluohjeen avulla pystyttiin laskemaan tuoteperheen pienin ja suurin tarvittava kurkun halkaisija (Metso Power [a]).

Koska erilaisten tuoteyksilöiden lukumäärä haluttiin rajoittaa, ei kurkun halkaisijaa voinut jättää vapaasti valittavaksi pienimmän ja suurimman mahdollisen halkaisijan rajoittamalta väliltä. Oli siis selvitettävä, mikä on jäähdytysprosessin kannalta sallittava virtauspinta-alan muutos edelliseen kokoon verrattuna. Tuoteinsinöörien kanssa käytyjen neuvottelujen perusteella päädyttiin ratkaisuun, jossa kurkun virtauspinta-ala saa kasvaa edelliseen kokoon verrattuna noin 10–15 %. Mahdollisten kurkkujen halkaisijoiden lukumäärä saatiin näin vähennettyä sadoista muutamaan kymmeneen.

Vesireikien lukumäärä

Venturiputken kurkun pituus on määräytynyt vesireikien rivimäärän mukaan. Mahdollisina muuttujina olivat vesireikien kokonaislukumäärä, reikien lukumäärä riviä kohden sekä rivien lukumäärä. Yhtenä vaihtoehtona oli myös reiän koon muuttaminen ja kaikkien tapojen yhdistelmä.

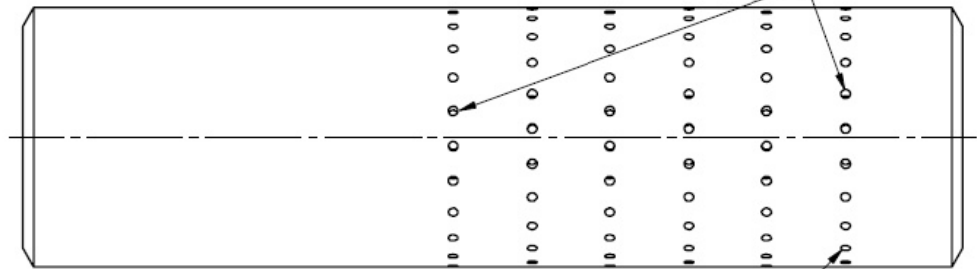
Vaihtoehto, jossa reikien lukumäärä kurkun halkaisijaa kohden olisi vakio ja reikien kokoa muutettaisiin tapauskohtaisen jäähdytysveden määrän mukaan, todettiin huonoksi. Reikien kokoskaala olisi tässä ratkaisussa kasvanut liian suureksi. Reiän koko päätettiin siten vakioida.

Kurkun pituus haluttiin vakioida turhien muuttujien minimoimisen takia. Suurimman mahdollisen tarvittavan jäähdytysveden määrän mukaan arvioitiin tarvittava reikien maksimimäärä. Suunnitteluohjeen avulla voitiin määrittää suurin sallittu reikämäärä yhdessä reikärivissä jokaista kurkun halkaisijaa kohden. Kurkun pituus määritettiin si-

ten, että suurimmalla vesimäärällä siihen juuri mahtuu tarvittava reikämäärä. Venturi-putken kurkun pituuden kasvusta ei ole haittaa.

Reikien lukumäärä yhtä riviä kohden asetettiin vakioksi jokaista kurkun halkaisijaa kohden. Reikien kokonaismäärää voi siten kasvattaa tai pienentää rivissä olevien reikien määrän suuruusina askelina. Eri käyttötilanteita mallintavassa laskennassa tämä todettiin riittäväksi tarkkuudeksi reikien lukumäärän valintaan. Kurkun rei'itettyä aluetta suunniteltaessa riittää tarvittavien reikien lukumäärän selvittäminen. Siten iteratiivinen suunnittelu reikärivien määrän ja reikien määrän riviä kohden välillä jää kokonaan pois. Reikien lukumäärän määräytymistä havainnollistaa kuva 4.4.

Rivimäärää muuttamalla reikien kokonaismäärä voi muuttua.



Kurkun halkaisija määrää rivissä olevien reikien lukumäärän.

Kuva 4.4. Venturiputkessa olevien vesireikien lukumäärän määräytyminen.

Vesikotelo ja vesiliitin

Vesiliitännältä vesikotelolle menevän vesiputken kiinnittämiseen kotelon kanteen oli käytetty kahta eri menetelmää, hitsausta ja kierrelitosta. Hitsaus suoritettiin kammioputken vesiputkea varten tehdyn reiän kautta. Reiän halkaisijan tuli siten olla huomattavasti vesiputken halkaisijaa suurempi, jotta hitsaus pystyttiin suorittamaan. Hitsaus tämän pienen raon kautta on osoittautunut hankalaksi. Lisäksi suurempi reikä kammioputkessa edellyttää halkaisijaltaan suurempaa vesiliitännää. Vesiliitännän halkaisijan kasvattamista rajoittaa siihen kohdistuvat rasitukset. Rasitusten takia vesikotelon halkaisijan kasvattaminen edellyttää vesiliitännän seinämävahvuuden kasvattamista. Toisaalta vesiliitännän seinämävahvuus ei saa ylittää kammioputken seinämävahvuutta.

Kierteellä toteutettu putken kiinnitys voidaan toteuttaa hitsaukseen verrattuna pienemmällä kammioputken tehtävällä reiällä. Siten ongelmia vesiliitännän lämpörasitusten keston kanssa ei esiinny. Vesikoteloon kierre on toteutettu erillisen kierreholkin avulla, joka on kierteen tekemisen jälkeen hitsattu vesikoteloon kiinni. Hitsaus on aiheuttanut muodonmuutoksia kierteseen ja putken kiertäminen on ollut ongelmallista. Lisäksi kotelon valmistaminen eri osista hitsaamalla on työlästä. Kierteen koneistaminen vesiputkeen ei lisää putken valmistuksen monimutkaisuutta, sillä kyseinen osa on tyyppillisesti valmistettu koneistamalla.

Putken liitostapaa käsiteltiin neuvottelussa yhdessä valmistuksen kanssa. Liittämisestä hitsaamalla päätettiin luopua juuri vesiliitännän rasitusten tuomien ongelmien

vuoksi. Kun putkea ei hitsata kammiossa olevan reiän kautta, voidaan reikä ja siten myös vesiliitin mitoittaa pienemmäksi. Parhaimmaksi ratkaisuksi sovittiin kierreliitos, jossa vesikotelo valmistetaan niin paksusta materiaalista, että kierre voidaan tehdä suoraan siihen. Tällöin vältetään kierreholkin hitsaamisen tuomilta ongelmilta ja osan valmistus on yksinkertaista. Kierreliitoksesta valmistettiin toiminnallisuuden varmistamiseksi prototyyppi. Sen perusteella havaittiin kierreliitoksen soveltuvan liittämiseen hyvin.

Vesiliittimen koko korreloi kammioputken koon kanssa. Tehtyjen projektien perusteella päädyttiin käyttämään muutamaa erikokoista vesiliitintä. Todettiin, ettei jokainen kammiokoko tarvitse uniikkia vesiliittimen kokoa, joten yksi vesiliitinkoko käy muutamaan erikokoiseen kammioon.

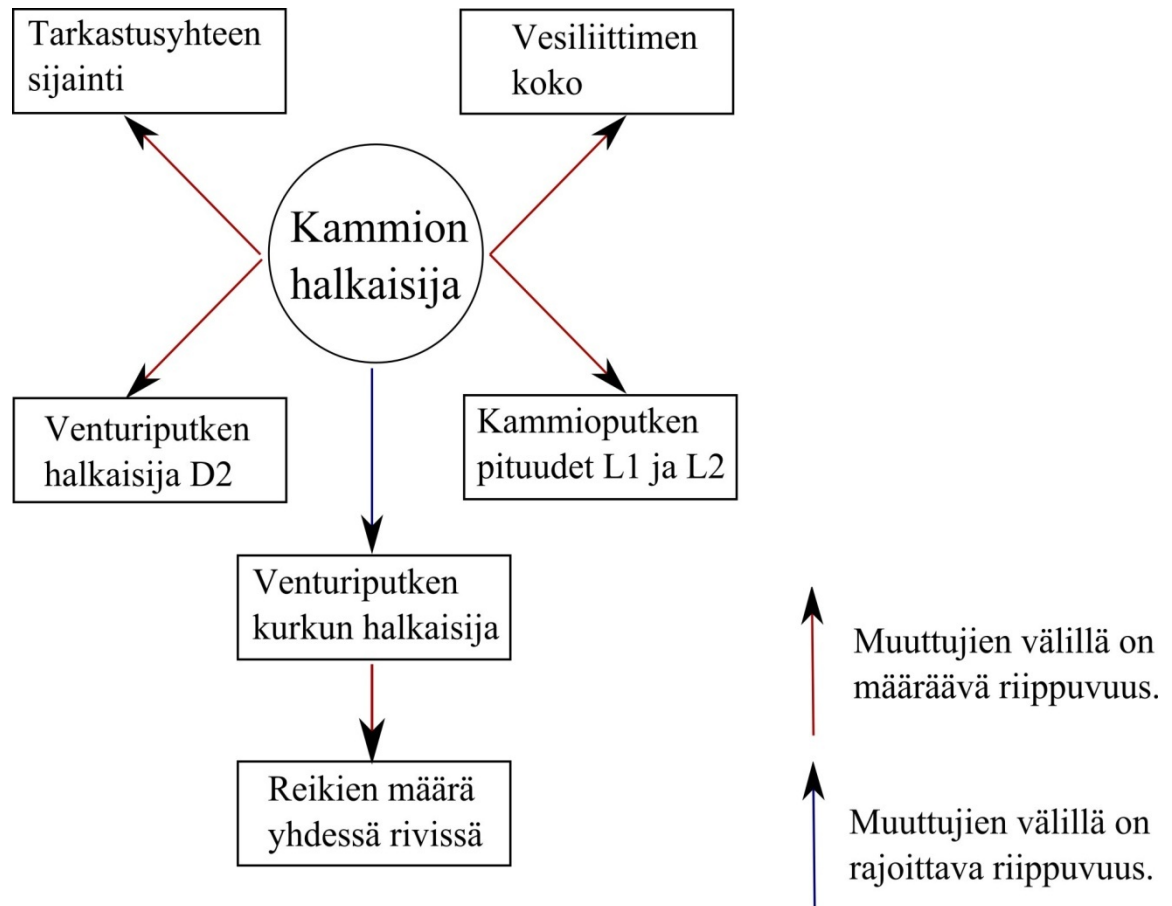
Tarkastusyhde

Tarkastusyhde on aiemmin voinut olla asennettuna joko höyrynjäähdyttimeen suoraan tai sitä edeltävään höyryn virtausputkeen. Koska tarkastusyhteen kautta tarkastetaan nimenomaan höyrynjäähdyttimen sisäpuolisten osien kunto, päätettiin tarkastusyhde ottaa osaksi höyrynjäähdytintä. Höyrynjäähdyttimeen tarkastusyhde voidaan asentaa suoraan verstaalla. Höyryn virtausputkeen asennus on voitu tehdä vasta höyrykattilan kausuvaiheessa rakennustyömaalla.

Tarkastusyhteeksi valittiin myös muissa höyrykattilan osissa käytetty vakiokokoinen tarkastusyhde. Sama toiminto voidaan toteuttaa eri tuoteperheissä samalla osalla. Uuden tuotemäärittelyn mukaisessa höyrynjäähdyttimessä ei siten tarvitse käyttää suunnitteluresursseja tarkastusyhteen valintaan lainkaan. Tarkastusyhteen paikka määräytyy kammion halkaisijan perusteella.

4.3 Lopullinen rakenne

Uuden tuotemäärittelyn mukaisen höyrynjäähdyttimen projektikohtaisen tuoteyksilön suunnittelun lähtökohtana on kammion ulkohalkaisija. Kammion halkaisijan kasvu edellyttää lähes kaikkien muiden jäähdyttimien osien kasvamista. Höyrynjäähdyttimet ovat siten Simpsonin (2006) määritelmän mukaan parametrinen tuoteperhe ja kammion halkaisija on ainoa laatuinen muuttuja. (Simpson et al. 2006, s. 8). Kuva 4.5 havainnollistaa höyrynjäähdyttimen muuttujien keskinäisiä suhteita.



Kuva 4.5. Kammion ulkohalkaisija vaikutus höyryjäähdyttimen muihin muuttujiin.

Muutokset tuoteyksilöiden kesken, joilla on sama kammion ulkohalkaisija, on pyritty pitämään mahdollisimman pieninä. Kammioputken mitat L1 ja L2 sekä venturiputken suoran osuuden halkaisija D2 pysyvät muuttumattomina. Ne ovat siten Simpsonin (2006) määritelmän mukaan yhteisiä muuttujia (Simpson et al. 2006, s. 138). Samoin vesiliittimen koko ja tarkastusyhteen sijainti määräytyvät kammioputken halkaisijan perusteella. Kuvassa 4.5 määräävä suhde on osoitettu punaisella nuolella.

Venturiputken kurkun halkaisija sekä kurkussa olevien vesireikien lukumäärä ovat ainutlaatuisia muuttujia. Venturiputken suoran osuuden halkaisijan D2 kautta kammion ulkohalkaisija määrää kurkun halkaisijan minimi- ja maksimiarvot. Kuvassa 4.5 sininen nuoli osoittaa Tämän alueen sisällä mahdolliset kurkun halkaisijat ovat määritettyinä kurkun poikkileikkauksen pinta-alan mukaan noin 15 % kokoportaina. Vesireikien lukumäärä voidaan valita prosessiarvojen perusteella tietyltä väliltä reikärivien lukumäärää muuttamalla. Kokoportaana on vesireikien lukumäärä yhdessä rivissä. Vesireikien lukumäärä yhdessä rivissä määräytyy kurkun halkaisijan perusteella.

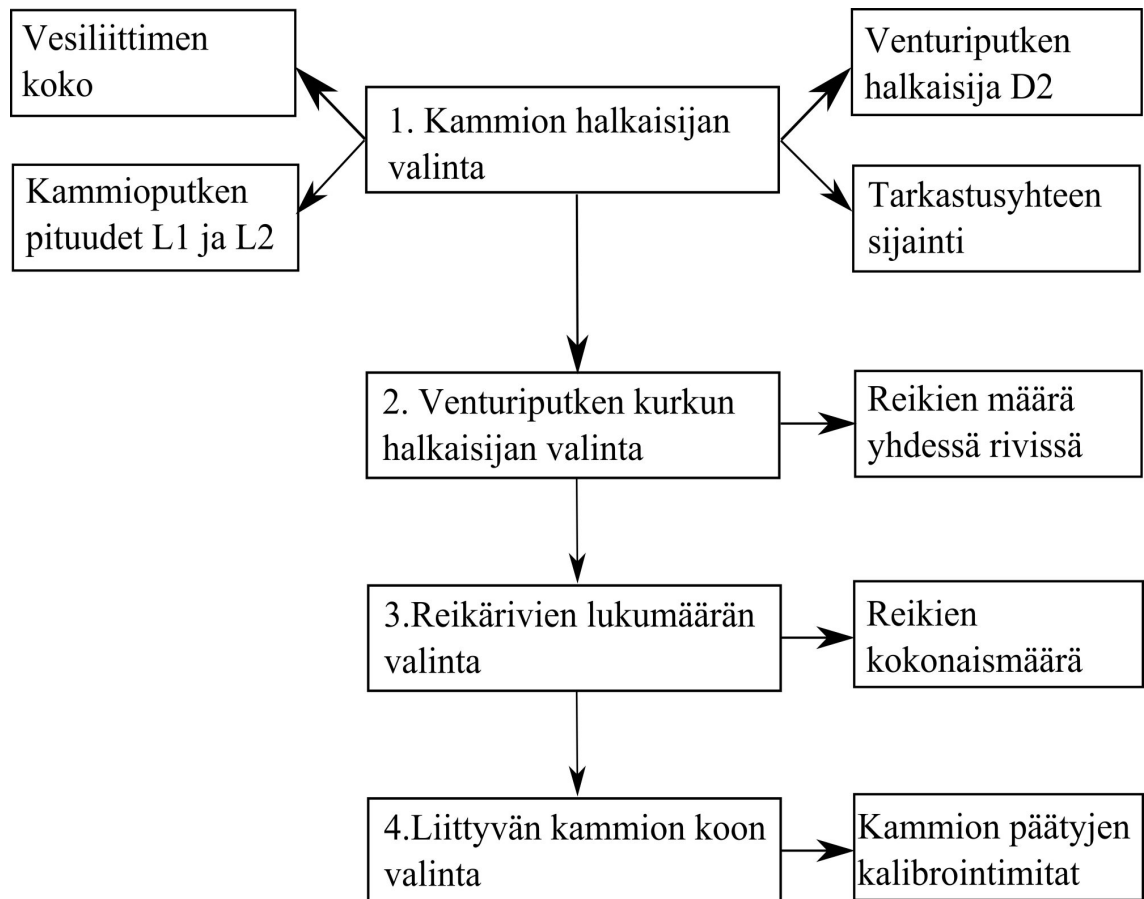
Venturiputken supistuvan osan sekä avartuvan osan pituudet määräytyvät päätyjensä halkaisijoiden perusteella, sillä niiden supistus- ja avarruskulma ovat vakioita kaikissa tuoteyksilöissä. Venturiputken suoran osuuden pituus määräytyy avartuvan osuuden pituuden perusteella, sillä suoran osuuden etäisyys kammioputken päästä on vakio.

Höyryjäähdyttimessä käytettävä tarkastusyhde on sama, kuin muissa höyrykattilan osissa käytettävä tarkastusyhde. Hvam et al. (2008) esittämän modulaarisuuden määri-

telmän mukaan kyseessä on saman elementin jakaminen useissa tuoteperheissä. Tarkastusyhteen sijainti määräytyy kammion halkaisijan perusteella.

4.4 Uusi suunnitteluprosessi

Uuden tuotemäärittelyn mukaisen jäähdyttimen projektikohtainen suunnittelu jakautuu neljään vaiheeseen. Nämä neljä vaihetta ovat esitettyinä kuvassa 4.6. Kuvaan on merkitty jokaisessa vaiheessa määräytyvät jäähdyttimen muuttujat.



Kuva 4.6. Uuden tuotemäärittelyn mukaisen höyryjäähdyttimen tuoteyksilön suunnitteluprosessi jakautuu neljään vaiheeseen.

Höyrykattilassa käytettävä kammiokoko päätetään ennen höyryjäähdyttimien suunnittelun aloittamista. Siten höyryjäähdytintä suunniteltaessa kammiokoon valintaan riittää lujuusmielessä riittävän vahvuisen kammion materiaalin ja seinämän paksuuden valinta. Kammion halkaisijan valinta määrittelee valtaosan höyryjäähdyttimen muista muuttujista. Varsinaista suunnittelua vaativat vain jäähdytysprosessin kannalta ainutlaatuiset muuttujat. Ne ovat siis venturiputken kurkun halkaisija sekä vesireikien lukumäärä. Ne määräytyvät höyrykattilan prosessitietojen perusteella tässä työssä aiemmin mainituilla tavoilla.

Edellä mainittujen muuttujien arvojen valinta on tuoteinsinöörin vastuulla. Uuden tuotemäärittelyn ansiosta projekti-insinöörin suorittama detajlisuunnittelu ei sisällä enää

lainkaan jäädyttimen muuttujien arvojen valintaa. Projekti-insinöörin tehtäväksi jää jäädyttimen 3D-mallin muodostaminen uudella suunnitteluautomaatilla, rakenteen lujuustarkastelu sekä automaatin tuottamien piirustusten tarkistus.

5 HÖYRYNJÄÄHDYTTIMEN SUUNNITTELU-AUTOMAATIN TEKEMINEN

Tässä luvussa kuvaillaan uuden tuotemäärittelyn mukaisen höyrynjäähdyttimen suunnitteluautomaatin tekeminen. Suunnitteluautomaatti koostuu tuotteen perusmallista ja sitä muokkaavasta konfiguraattorista. Suunnitteluautomaatin perusmalli ja työpiirustukset tehtiin SolidWorksillä ja konfiguraattori tehtiin AutomateWorksillä. Nämä työkalut ovat esiteltyinä kappaleessa 3.4.

Suunnitteluautomaatin tekeminen jakautuu kolmeen vaiheeseen. Nämä vaiheet ovat perusmallin rakentaminen, tuotetiedon tallentaminen ja käyttöliittymän tekeminen Excel-tiedostoon ja viimeisenä testaus sekä piirustusten tekeminen. Näitä vaiheita on kuvattu tässä luvusta jokaista omassa alaluvussaan. Viimeisessä alaluvussa on kuvattu uuden suunnitteluautomaatin käyttö.

5.1 Perusmallin tekeminen

Vanhaa suunnitteluautomaattia olisi voinut käyttää uuden tuotemäärittelyn mukaisen suunnitteluautomaatin lähtökohtana. Vanha perusmalli olisi pitänyt rakentaa kokonaan uudestaan, koska teknisistä syistä johtuen osat olisi pitänyt mallintaa toisella tavalla. Lisäksi vanha perusmalli koostuu täysin projektiosista ja uusi malli hyödyntää pääasiassa vakio-osia. Myös vanha Excel-tiedosto olisi vaatinut mittavia muutoksia. Vanha suunnitteluautomaatti tarvitsi noin 30 lähtöarvoa, koska vanhan tuotemäärittelyn mukainen jäähdytin sisälsi huomattavasti uutta määrittelyä enemmän projektikohtaista suunnittelua.

Perusmallin rakentaminen aloitettiin siis täysin alusta. Ennen varsinaisen mallintamisen aloittamista päätettiin, mistä osista tehdään vakio-osia ja mitkä jäävät projekti-kohtaisiksi osiksi. Yrityksen sisäisistä syistä johtuen projektiosiksi päätettiin höyrynjäähdyttimen kammioputki, tarkastusyhde ja venturiputken takaosan pysäytinpalat. Vakio-osiksi jäivät siten venturiputki kokonaisuudessaan, vesikotelo, vesiliitin sekä venturiputken etuosan kiinnitysosat. Jako vakio-osiin ja projekti-osiin on esitettyinä taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1. Höyrynjäähdyttimen osien jako vakio-osiin ja projekti-osiin.

Projektiosat	Vakio-osat
Kammioputki	Venturiputki
Tarkastusyhde	Vesikotelo
Takapään pysäytinpalat	Vesiliitin
	Etupään kiinnitysosat

Mallintaminen aloitettiin tekemällä päätason kokoonpanoon pohjapiirros-skitsi sekä muutama aputaso. Pohjapiirros-skitsi koostuu apuviivoista, pisteistä ja ympyröistä. Niillä esitetään höyrynjäähdyttimen rakenne. Projektiosien mitat, kuten kammioputken pituus ja halkaisija, yhdistettiin tähän pohjapiirrokseen relaatioilla. Siten suunnitteluautomaattia käytettäessä AutomateWorks tekee kaikki mittamuutokset tähän pohjapiirrustukseen. Näin malli pysyy selkeänä ja suunnitteluautomaatin muokkaaminen on tarvittaessa helppoa.

Perusmallissa ei käytetty lainkaan SolidWorksin yhtälöitä (equations). Niiden avulla olisi voitu siirtää osa tuoteyksilön rakenteen päättelystä Excelistä SolidWorksiin. Konfiguraattorista olisi saatu siten yksinkertaisempi, mutta päättelylogiikka olisi silloin hajautettuna sekä malliin että konfiguraattoriin. Tämä saattaisi hankaloittaa suunnitteluautomaatin päivittämistä. Paljon laskentaa sisältävä perusmalli hidastaa erityisesti suurien mallien suunnitteluautomaatin läpimenoaikaa.

Aputasoja käytettiin osien liittämiseen toisiinsa, eikä yhtään osaa liitetty suoraan toiseen osaan. Näin esimerkiksi yksittäisen osan vaihtaminen ei edellytä muutoksia jäljelle jäävien osien liitoksiin. Koska AutomateWorksillä uusien liitoksien tekeminen osien välille ei ole mahdollista, on perusmalli rakennettava siten, että osien liitokset ovat muista osista riippumattomia.

Vakio-osat jaettiin valmistuksen kannalta loogisiin osakokoonpanoihin. Mittamuutoksia ei vakio-osiiin voi tehdä, vaan eri kokovariaatiot toteutettiin joko osan konfiguraatioina tai kokonaan omina osinaan. Venturiputken kurkun sisähalkaisijan muutos tietyn kammiokoon sisällä toteutettiin konfiguraatioilla ja venturiputken koon vaihtuminen kammioputken koon mukaan toteutettiin eri osilla. Siten kammioputken koon muutos edellyttää venturiputken osan vaihtoa ja venturiputken kurkun koon muutos konfiguraation vaihtoa.

Venturiputki koottiin vakio-osista omaksi alikokoonpanokseen. Koska erilaisten venturiputkien lukumäärä kohosi useisiin kymmeneen, kokoonpano päätettiin jättää projektikohtaiseksi. Jos kokoonpano olisi päätetty tehdä vakiokokoonpanoksi, olisi jokainen variaatio pitänyt tallentaa omana kokoonpanonaan tai konfiguraationaan. Projektikohtaisena kokoonpanoja tarvitsi vain yhden, sillä eri variaatiot voidaan muodostaa AutomateWorksillä kokoonpanon osia ja niiden konfiguraatioita vaihtamalla.

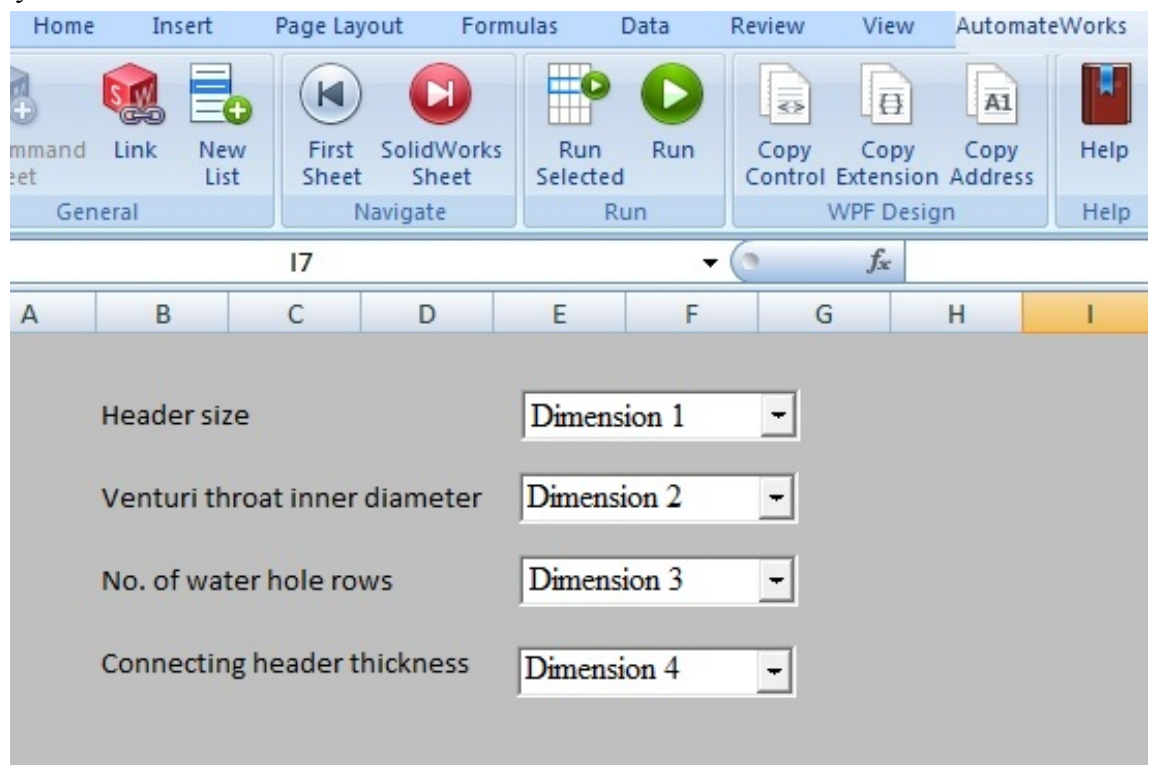
Perusmalli rakennettiin pienimmän jäähdyttimen määritelmän mukaan ja valmis perusmalli tallennettiin tuotetiedon hallintajärjestelmään. Projektikohtaisen tuoteyksilön mallin tekemiseksi perusmalli tulee ensin kopioida projektikohtaiseen hakemistoon ja sen jälkeen suorittaa tarvittavat muutokset konfiguraattorilla. Perusmallia voi muuttaa vain suunnitteluautomaattia päivitettäessä.

5.2 Konfiguraattorin tekeminen

Konfiguraattorin tekeminen jakautuu kolmeen vaiheeseen. Nämä vaiheet ovat käyttöliittymän tekeminen, tuotetiedon tallentaminen ja logiikan tekeminen sekä viimeisenä vai-

heena konfiguraattorin ja perusmallin yhdistäminen AutomateWorksillä. Käyttöliittymään konfiguraattorin käyttäjä syöttää tarvittavat lähtöarvot. Tallennetun tuotetiedon ja logiikan avulla konfiguraattori päätelee tarvittavan tuoteyksilön rakenteen. Kuten kappaleessa 3.4. todettiin, AutomateWorks edellyttää konfiguraattorin rakentamista Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelmaan.

Konfiguraattorin etusivulle tehtiin tarvittaville muuttujille pudotusvalikot, joista käyttäjä valitsee haluamansa arvot. Pudotusvalikot sisältävät ennalta määrytyt tuotemäärittelyn mukaiset valittavat arvot. Konfiguraattorin käyttäjä ei voi syöttää niihin vapaa-valintaisia arvoja. Kappaleen 4.3 mukaisesti konfiguraattorin etusivulta löytyvät valinnat kammion koolle, venturiputken kurkun sisähalkaisijalle, vesireikien rivimäärälle sekä liittyvien kiertoputkien koille. Konfiguraattorin etusivun pudotusvalikot on esitettyä kuvassa 5.1.



Kuva 5.1. Höyrynjäähdyttimen ainutlaatuisten muuttujien pudotusvalikot suunnitteluautomaatin käyttöliittymässä.

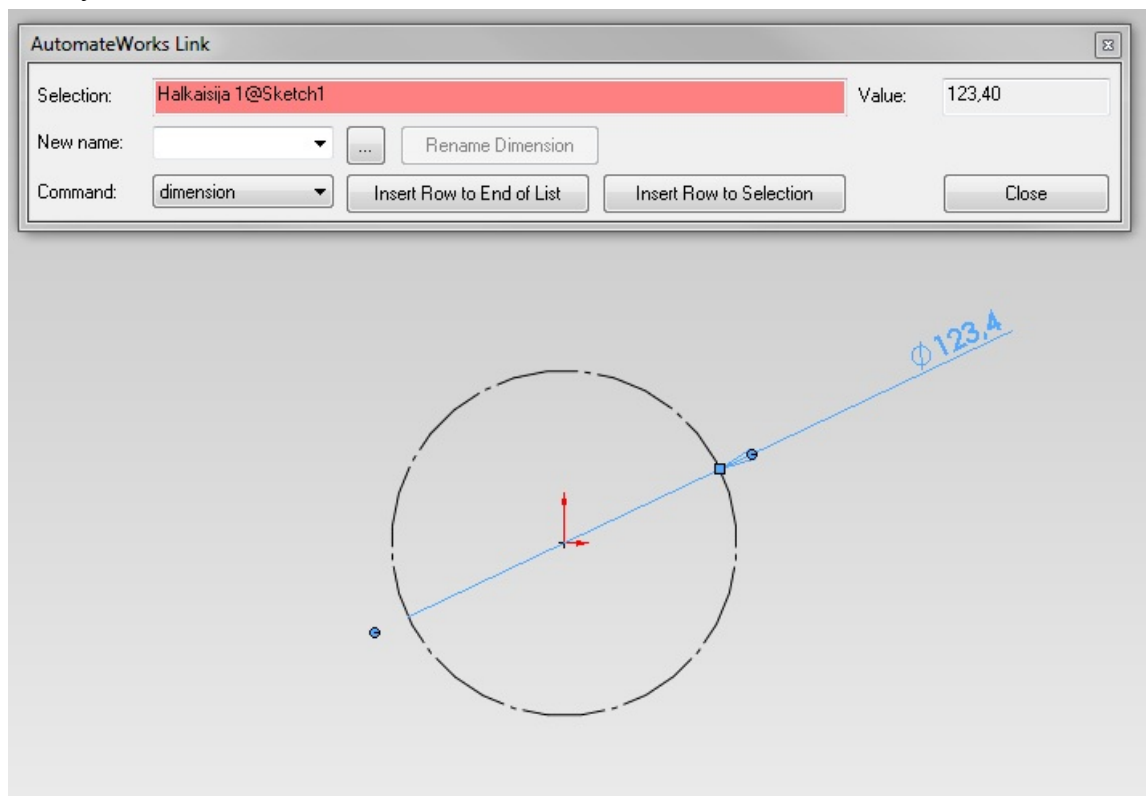
Kuvan 4.5 mukaan kammionputken koko rajoittaa mahdollisten venturiputken kurkujen joukkoa. Pudotusvalikot toteutettiin siten, että venturiputken kurkulle näytettiin vain ne arvot, jotka ovat mahdollisia kyseisellä kammiokoolla. Näin poistettiin mahdollisuus tehdä konfiguraattorilla tuotemäärittelyn vastainen tuoteyksilö, sillä konfiguraattorin käyttäjä ei voi vahingossakaan valita arvoa, joka ei ole tuotemäärittelyn mukainen.

Pudotusvalikkojen viereen laitettiin kuva, joka esittää höyrynjäähdyttimen rakennetta. Kuvan alle tehtiin taulukko, jossa esitetään kaikki konfiguraattorin päätelemät tuoteyksilön muuttujien arvot. Taulukon ja kuvan avulla konfiguraattorin käyttäjä voi tarkistaa tuoteyksilön oikeellisuuden ennen muutosten syöttämistä perusmalliin.

Konfiguraattori edellyttää tuotemäärittelyvaiheessa kehitetyn tiedon tallentamista konfiguraattoriin. Valtaosa tuoteperheen rakenteesta tallennettiin taulukkomuodossa konfiguraattoriin. Määraävät muuttujat sijoitettiin riveille ja määrätyt muuttujat sarakkeisiin. Projektiosiin tarvittavat muutokset konfiguraattori syöttää mittamuutoksina pohjapiirros-skitsin kautta. Oikeat mitat konfiguraattori päättelee yksinkertaisesti lukemalla oikeat arvot taulukon oikeilta riveiltä. Rivit valitaan konfiguraattorin käyttäjän valitsemien määräävien muuttujien arvojen perusteella.

Kuten todettu, vakio-osissa kokovaihtoehdot toteutettiin joko osan konfiguraatioina tai erillisinä osina. Vakio-osien koon muuttaminen edellyttää siten tuoteyksilön mallissa mahdollisesti sekä osien konfiguraatioiden että osien vaihtamista. Tätä varten konfiguraattoriin tehtiin logiikka tiedostonimien ja konfiguraatioiden päättelyyn. Käyttäjän valintojen perusteella konfiguraattori päättelee oikeat tiedostonimet sekä konfiguraatiot. Logiikan rakentamiseen käytettiin ehtolauseita ja Excelin funktioita.

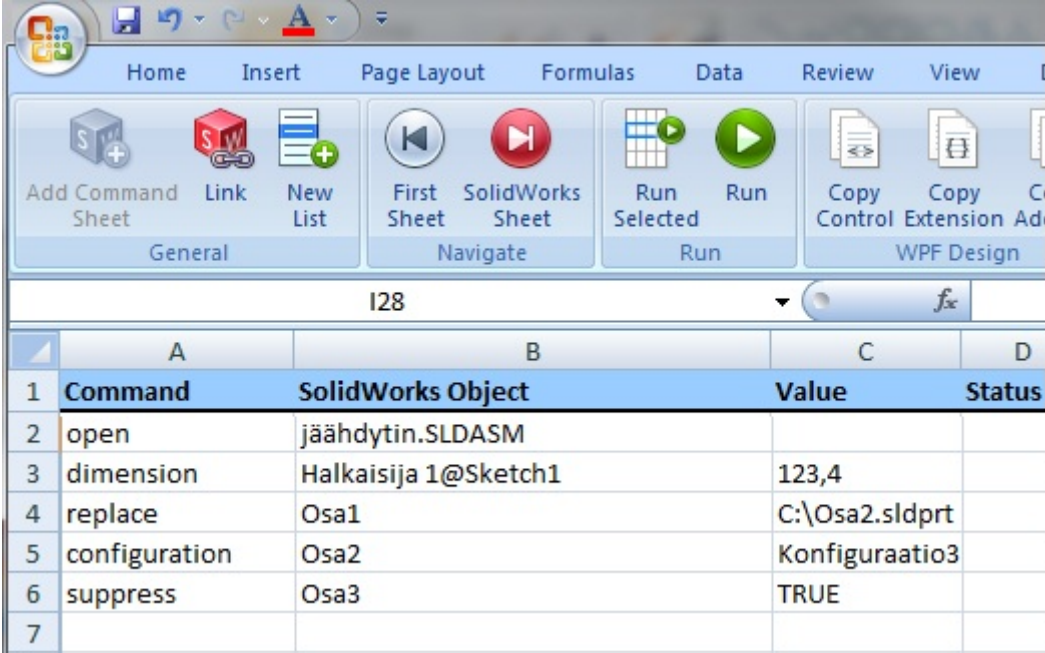
Yhdistäminen Excel-tiedoston ja perusmallin välillä tehtiin AutomateWorksin omalla linkitystyökalulla. Linkitystyökalun avulla jokainen muuttuja, jonka arvoa konfiguraattorin tulee muuttaa, yhdistettiin perusmallista konfiguraattoriin. Linkitystyökalu on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Ympyrän halkaisijan linkittäminen konfiguraattoriin AutomateWorksin linkitystyökalulla.

Yhdistämistä tehtäessä perusmallista osoitetaan muutosta tarvitseva kohde, esimerkiksi osan mitta tai vaihdettava osa. Linkitystyökalusta valitaan tehtävä toimenpide eli komento (command). Komentoja ovat esimerkiksi mitan arvon muuttaminen (dimensio) tai osan vaihto (replace). Komennon lisääminen konfiguraattoriin tapahtuu linkitys-

työkalun Insert Row to Selection -painikkeella. Linkitystyökalu lisää kaikki komentorivit konfiguraattoriin syöttösivulle. Esimerkki syöttösivusta on kuvassa 5.3.



1	Command	SolidWorks Object	Value	Status
2	open	jäähdytin.SLDASM		
3	dimension	Halkaisija 1@Sketch1	123,4	
4	replace	Osa1	C:\Osa2.sldprt	
5	configuration	Osa2	Konfiguraatio3	
6	suppress	Osa3	TRUE	
7				

Kuva 5.3. Konfiguraattorin syöttösivu koostuu malliin ajettavista komennoista.

Syöttösivulla on kolme merkittävää saraketta. Komentosarakkeessa (command) on komennon nimi. Se määrittää kohteelle (SolidWorks Object) tehtävän toimenpiteen. Arvokenttään (value) tulee kohteeseen syötettävä arvo. Esimerkiksi kuvassa 5.3 rivillä 3 asetetaan dimension-käskyllä Halkaisija 1:n arvoksi 123,4 millimetriä. Kunkin komentorivin arvosarakkeen soluun yhdistetään solu, jossa on kyseisen muuttujan päätelty arvo. Esimerkiksi komentorivin, jossa asetetaan kammioputken mitta L2, arvosarakkeen solu linkitetään soluun, jossa on esitettyä konfiguraattorin päättelemä L2 mitan arvo. Suunnitteluautomaattia käytettäessä konfiguraattori toteuttaa kaikki syöttösivulla olevat komennot.

Konfiguraattorin logiikan ja linkityksen valmistuttua lisättiin konfiguraattoriin tarpeellisiin kohtiin kommentteja. Kommenteilla selvitettiin ehtolauseiden ja Excelin funktioiden käyttötarkoituksia. Kommentoinnin tarkoituksena on helpottaa suunnitteluautomaatin mahdollista päivittämistä tulevaisuudessa. Konfiguraattorin muokkaamisen tulee onnistua muiltakin, kuin konfiguraattorin tekijältä.

Muokattavuuden takia konfiguraattori pyrittiin tekemään mahdollisimman yksiker-
taiseksi. Siksi logiikan tekemisessä välteltiin pitkiä ehtolausekkeita ja useille eri väli-
lehdille linkitettyjä solujen arvojen laskentoja. Konfiguraattorin päivitys on tarpeen
esimerkiksi silloin, jos höyryjäähdyttimen tuotemäärittelyä on muutettu.

5.3 Suunnitteluautomaatin testaus ja työpiirustusten tekeminen

Konfiguraattorin valmistumisen jälkeen suunnitteluautomaatin toiminta testattiin teke-
mällä sillä jokaista mahdollista tuoteyksilöä vastaava malli. Näin voitiin varmistua siitä,

että konfiguraattorin sisältämä logiikka ja tallennettu tuotetieto ovat virheettömiä. Samalla tarkistettiin perusmalli ja kaikki vakio-osat.

Testauksen jälkeen viimeisenä vaiheena on työpiirustusten tekeminen. SolidWork-sissä piirustukset perustuvat 3D-mallin piirteisiin. Projektiosiin tehtävät mittamuutokset ja vakio-osien ja niiden konfiguraatioiden vaihdot päivittyvät siten automaattisesti perusmallin kokoonpanopiirustukseen sekä projektiosien työpiirustuksiin. Tämä tuli huomioida projektiosien työpiirustusten ja kokoonpanokuvan mitoituksia tehtäessä, sillä esimerkiksi osan vaihtaminen rikkoo osan muotoviivaan kytketyn mitan. Siksi mitoituksessa hyödynnettiin perusmallin pohjapiirros-skitsiä. Kytkemällä mittoja pohjapiirroksen, ei osan vaihtaminen riko mittaa, sillä se on kytketty pohjapiirroksen, eikä muotoviivaan.

Kuten todettu, vakio-osien piirustukset ovat muuttumattomia ja hyväksytyjä. Niissä mitoitus tehtiin suoraan piirustusten muotoviivoihin. Koska vakio-osien piirustuksia ei voi muokata hyväksymisen jälkeen, osoitetaan niissä eri konfiguraatioissa olevat erisuuruiset mitat taulukossa. Osan tiettyyn konfiguraatioon liittyy tietty tunnistenumero, jonka perusteella taulukosta nähdään muuttuvien mittojen oikeat arvot.

5.4 Suunnitteluautomaatin käyttö

Höyrynjäähdyttimen projektikohtaisen tuoteyksilön 3D-mallin tekeminen alkaa perusmallin kopioimisella projektihakemistoon. Kopioinnin jälkeen projekti-insinööri valitsee konfiguraattorin käyttöliittymän pudotusvalikoista suunnitteluinsinöörin määrittämät lähtöarvot sekä muutaman muun tiedon. Arvot valitaan kuvan 5.1 esittämässä järjestyksessä ylhäältä alas. Arvojen valinnan jälkeen konfiguraattorin päättämä tuotteen rakenne voidaan tarkistaa käyttöliittymässä olevasta taulukosta.

Arvojen valinnan ja tarkistuksen jälkeen AutomateWorks käynnistetään Run - kuvakkeesta. AutomateWorks suorittaa jokaisen syöttösivulla olevan komennon. Muutosten syöttäminen kopioituun perusmalliin kestää alle minuutin.

Viimeisen komennon jälkeen tuoteyksilön 3D-malli on valmis. Projekti-insinööri tarkistaa automaatin tuottamien projektiosien työpiirustuksien sekä höyrynjäähdyttimen päätason kokoonpanopiirustuksen oikeellisuuden.

6 TULOSTEN TARKASTELU JA JATKOTOIMENPITEET

Tässä luvussa tarkastellaan työn tuloksia. Ensimmäisessä alaluvussa kehitettyä tuoteperhettä verrataan 152 projektista kerättyihin höyrynjäähdyttimen tietoihin ja arvioidaan tuoteperheen määrittelyn onnistumista. Toisessa alaluvussa tarkastellaan uutta suunnitteluautomaattia ja uuden tuotemäärittelyn vaikutuksia höyrynjäähdyttimen suunnittelu-prosessiin. Viimeisessä alaluvussa käsitellään aiheeseen liittyviä jatkotoimenpiteitä.

6.1 Tuotemäärittelyn arviointi

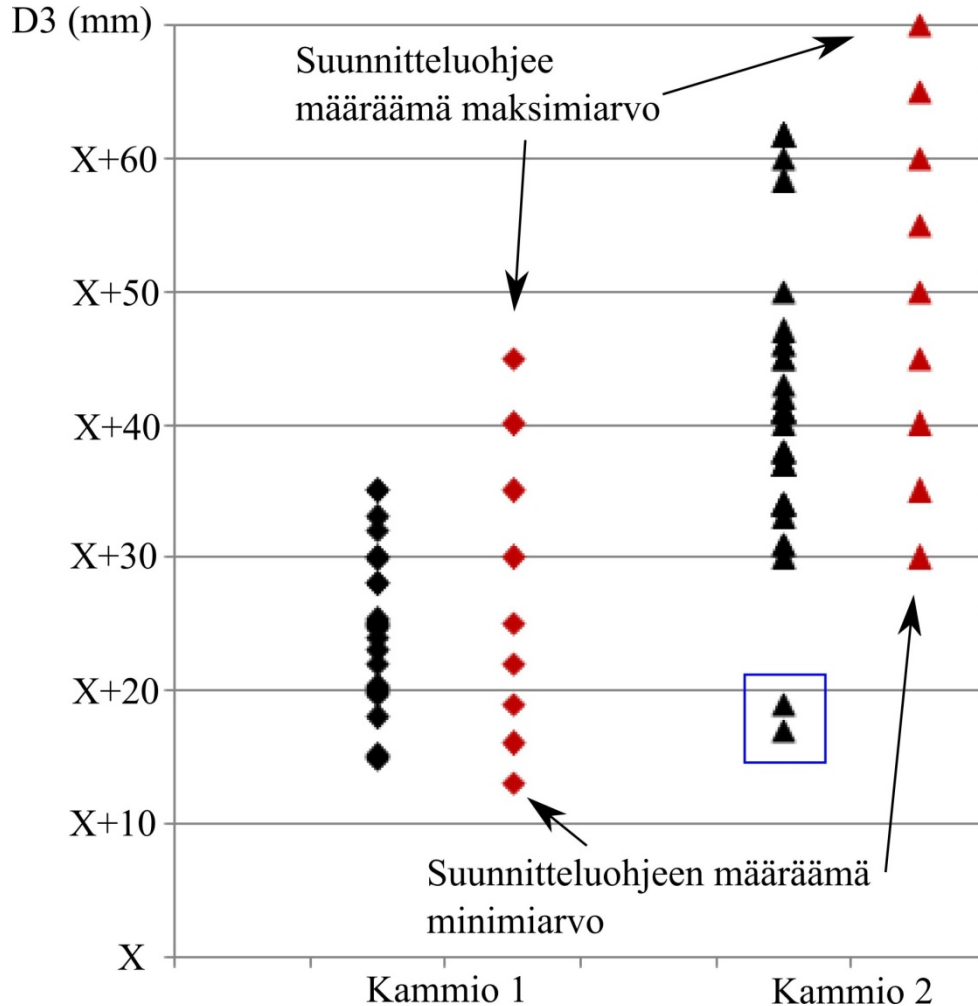
Tuotemäärittelyn alkuvaiheessa yrityksessä tehtiin päätös luopua toisesta höyrynjäähdytintyyppistä. Tällä päätöksellä oli merkittävä vaikutus jäähdyttimiin liittyvissä kustannuksissa esimerkiksi nimikkeiden hallinnan ja tuotekehityksen osalta. Päätös lisää myös samankaltaisuutta jäähdyttimien valmistukseen.

Uuden tuotemäärittelyn mukainen höyrynjäähdytin muodostaa tuoteperheen, jonka jokainen mahdollinen tuotevariantti on suunniteltu etukäteen. Höyrynjäähdyttimen ainutlaatuisten muuttujien arvot valitaan ennalta määräytyistä ratkaisujoukoista. Näistä muuttujista höyrynjäähdyttämisen kannalta oleellisia muuttujia ovat venturiputken kurkun halkaisija sekä kurkussa olevien reikärivien lukumäärä. Muut kaksi valittavaa arvoa, kammion ulkohalkaisija sekä seinämävahvuus ja liittyvän putken seinämävahvuus, eivät suoraan vaikuta höyryn jäähtymiseen.

Syntynyt tuoteperhe on pääsääntöisesti parametrinen. Kammioputken halkaisijan kasvaessa muutkin tuotteen mitat kasvavat. Höyrynjäähdyttimen kohdalla voidaan todeta yrityksessä siirrytyn ETO strategiasta MTO strategiaan. Kaikki mahdolliset variantit ovat etukäteen suunniteltuja. Niistä valitaan kuhunkin projektiin parhaiten sopiva yksilö. Tuotevariantteja suunniteltaessa pyrittiin niiden lukumäärä pitämään mahdollisimman alhaisena ja samalla täyttämään kaikki mahdolliset vaatimukset riittävällä tarkkuudella. Tämä saavutettiin tunnistamalla tuotteista yhteiset ja ainutlaatuiset muuttujat sekä rajoittamalla ainutlaatuisten muuttujien ratkaisujoukkoa. Koska tuoteperheen kaikki tuoteyksilöt ovat etukäteen tiedossa, voidaan jokainen tuoteyksilö muodostaa konfigurointiprosessin avulla.

Ainutlaatuisten muuttujien arvot valitaan etukäteen suunnitelluista diskreettejä arvoja sisältävistä ratkaisujoukoista. Eri vaihtoehtojen lukumäärä pyrittiin rajaamaan mahdollisimman pieneksi toiminnallisuuden sallimissa rajoissa. Aiemmin näiden muuttujien arvot olivat täysin vapaasti valittavissa suunnitteluohjeiden määräämien ratkaisualueiden sisältä.

Kuva 6.1 esittää venturiputken kurkun halkaisijoita kahdella eri kammiokoolla. Kuvassa mustalla ovat esitettyinä läpikäydyissä projekteissa toteutuneet kurkun koot ja punaisella uuden tuotemäärityksen mukaiset kurkkujen koot kyseisillä kammion ulkohalkaisijoilla. Sinisen suorakulmion sisällä olevat kurkun koot ovat suunnitteluohjeen määräämän alueen ulkopuolella.

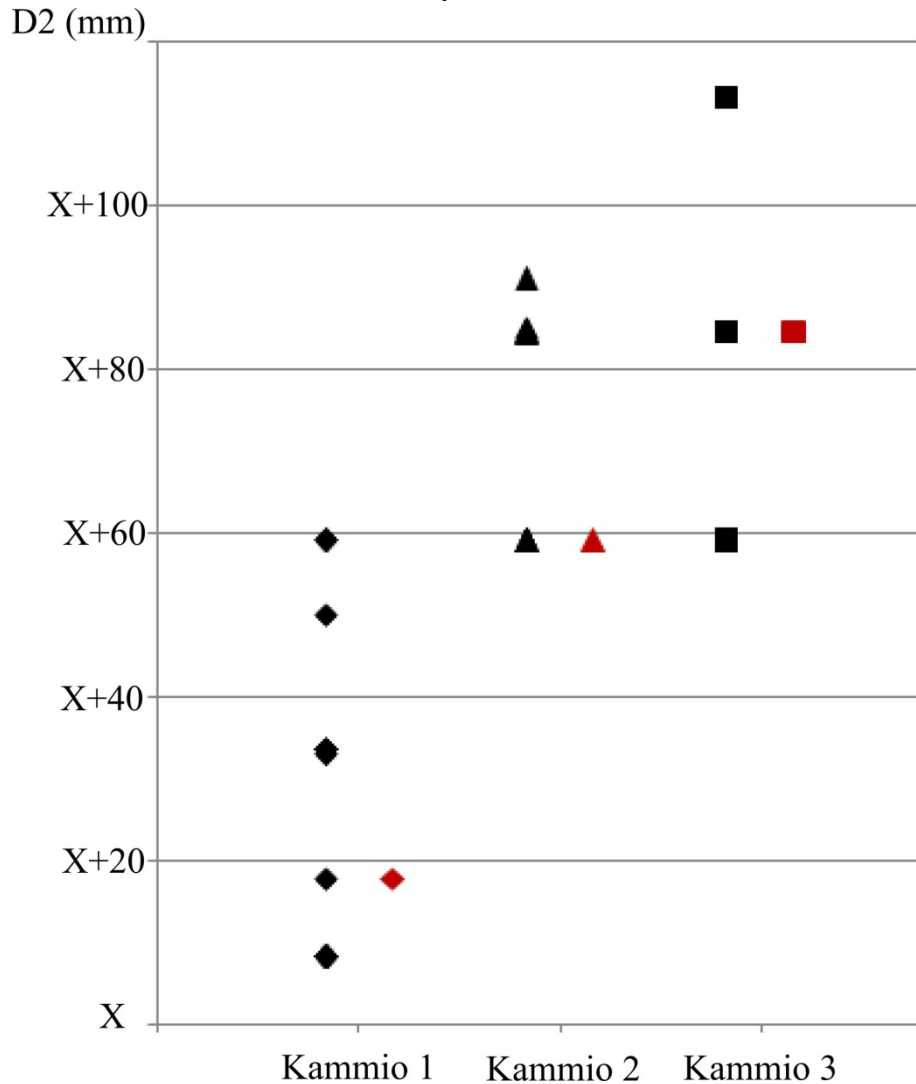


Kuva 6.1. Kurkun halkaisijat kahdella eri kammiokoolla. Mustalla ovat kuvattuina projekteissa käytetyt koot ja punaisella uuden tuotemäärityksen mukaiset vaihtoehdot.

Vanhan tuotemääritys rajoitti vain kurkun minimi- ja maksimihalkaisijan ja valinnan alueen sisällä on voinut tehdä portaattomasti. Kuvan 6.1 perusteella nähdään, että erot halkaisijoissa kurkkujen kesken ovat pieniä. Tämä on johtanut suureen määrään erikokoisia kurkkuja. Uudessa tuotemäärityksessä kurkkujen halkaisijat on porrastettu siten, että virtauspinta-ala kasvaa pienempään kokoon verrattuna 10–15%. Siten mahdollisia halkaisijoita on huomattavasti aiemmin tehtyjä vähemmän.

Höyrynjäähdyttimen yhteisten muuttujien arvot määräytyvät ainutlaatuisten muuttujien arvojen perusteella. Tämä vähentää variaatioiden määrää huomattavasti, sillä aiemmin toiminnallisuuden kannalta toisarvoisia asioita ei ollut ohjeistettu ja höyrynjäähdyttimet olivat usein tekijänsä näköisiä. Tehtyjen projektien perusteella voidaan todeta tämän johtaneen siihen, että tuoteyksilöiden välillä oli toiminnallisuuden kannalta täysin turhaa variointia.

Kuvassa 6.2 on esitetty venturiputken suoran osuuksien koot kolmella eri kammiokoolla. Mustalla ovat läpikäydyissä projekteissa käytetyt venturiputken koot ja punaisella ovat uuden tuotemäärittelyn mukaiset koot.



Kuva 6.2. Venturiputken halkaisijat kolmella eri kammiokoolla. Mustalla ovat kuvattui-
na projekteissa käytetyt halkaisijat ja punaisella uuden tuotemäärittelyn mukaiset koot.

Aiemmin venturiputken koon on voinut valita vapaasti. Valintaan ovat vaikuttaneet kammioputken halkaisijan lisäksi kammioputkelle valittu seinämävahvuus. Uuden tuotemäärittelyn mukaan yhdellä kammion ulkohalkaisijalla on aina samankokoinen venturiputki huolimatta kammion seinämävahvuudesta. Kammion seinämävahvuuden vaihtuminen kesken projektin esimerkiksi nousseen käyttölämpötilan takia ei siten edellytä muutoksia venturiputkeen.

Uusi tuotemäärittely mahdollistaa tuoteyksilön valinnan konfigurointiprosessin avulla. Tuoteyksilö sisältää vain ennalta suunniteltuja ratkaisuja eikä siten edellytä tapauskohtaista suunnittelua. Tuotteesta tunnistettiin ainutlaatuiset ja yhteiset muuttujat. Näin vähennettiin tuoteyksilön muuttujien arvojen valintaan tarvittavaa työtä. Niiltä osin voidaan tuotepuheen suunnittelun sanoa onnistuneen.

Ainutlaatuisten muuttujien ratkaisujoukkoja olisi voinut rajoittaa nykyistä tuotemäärittelyä enemmän. Erilaisten vaihtoehtojen määrää olisi siten saatu pienennettyä vielä huomattavasti. Tämä on kuitenkin hankalaa, sillä yrityksessä on totuttu optimoimaan tuotteet suorituskyvyn näkökulmasta mahdollisimman tehokkaiksi. Vaihtoehtojen vähentämisen koettiin haittaavan tuotteen suorituskykyä liiaksi. Myös toisesta jäähdytintyypistä luopumista vastustettiin aluksi voimakkaasti.

6.2 Vaikutukset suunnitteluprosessiin

Tuoteyksilön suunnitteluprosessi alkaa ainutlaatuisten muuttujien arvojen määrittämisellä. Jäähdyttimeen liittyvät putket ovat mitoitettuna jo aiemmin. Siten määritettäviä arvoja ovat venturiputken kurkun sisähalkaisija sekä kurkussa olevien reikärivien lukumäärä. Jos kyseisen kammioputken ulkohalkaisijalla on valittavissa eri seinämävahvuuksia, valitaan myös haluttu seinämävahvuus suunnittelun alkuvaiheessa. Kuvatun työvaiheen suorittaa tuoteinsinööri.

Tuoteinsinöörin vastuulla olevien muuttujien arvojen määrä on pudonnut noin kymmenestä kahteen. Näiden kahden muuttujan arvonmäärittäminen on aiempaa helpompaa, sillä niiden valintaa ei voi enää tehdä vapaasti tietyn alueen sisältä. Aiemmin ongelmana on ollut projekti-insinöörin tarvitsemien lähtötietojen saaminen tuoteinsinööritä. Vähentynyt muuttujien määrä ja helpottunut arvojen valinta todennäköisesti nopeuttavat lähtötietojen saamista tuoteinsinööreiltä.

Saamiensa lähtötietojen perusteella projekti-insinööri suorittaa jäähdyttimen detaljisuunnittelun. Koska ainutlaatuiset muuttujat määräävät tuoteyksilön geometrian, projekti-insinöörin vastuulle jää tuoteyksilön lujuustarkastelu sekä uuden suunnitteluautomaatin käyttäminen. Lujuustarkastelun perusteella valitaan kammioputken materiaali ja jos valinta on mahdollista, kammioputken seinämävahvuus. Lujuustarkastelun jälkeen suunnitteluautomaatin tarvitsemat lähtötiedot ovat määriteltynä. Projekti-insinööri tarkistaa suunnitteluautomaatin tuottamien työpiirustusten ja 3D-mallin oikeellisuuden. Tämän jälkeen alkaa jäähdyttimen valmistus.

Projekti-insinöörin vastuulla olevien muuttujien lukumäärä on pudonnut noin 20:stä kahteen. Vanha suunnitteluautomaatti tarvitsi lähtötiedoikseen noin 30 muuttujan arvot. Siihen ei ollut tallennettu juuri lainkaan tuotteen rakenteen päättelyyn tarvittavaa logiikkaa eikä tietoa tuotteen rakenteesta. Siten vanha automaatti tarvitsi huomattavan määrän lähtötietoja. Uusi suunnitteluautomaatti tarvitsee neljän varsinaisen tuotteen muuttujan arvot sekä niiden lisäksi muutaman muun tiedon, kuten kammiomateriaalin ja prosessiarvoja. Lähtötietojen kokonaismäärä uudessa automaatissa jää selkeästi alle kymmeneen.

Valtaosa höyryjäähdyttimen osista toteutetaan vakio-osina, joten niiden piirustuksia ei tarvitse lainkaan muokata, tarkistaa tai hyväksyä. Siten niiden piirustukset voidaan lähettää valmistukseen heti suunnitteluautomaatin käyttämisen jälkeen. Vain venturiputken kokoonpanopiirustus, tarkastusyhde sekä höyryjäähdyttimen päätason kokoon-

panopiirustus edellyttävät suunnitteluautomaatin käytön jälkeisiä tarkistuksia sekä hyväksynnän.

Tarvittavien lähtötietojen väheneminen ja vakio-osien käyttö nopeuttavat höyrynjäähdyttimen suunnitteluprosessia huomattavasti. Yhtään projektia ei ole vielä toteutettu uuden tuotemäärittelyn mukaisilla höyrynjäähdyttimillä, joten vertailua vanhaan määrittelyyn ei voida tehdä. Voidaan kuitenkin arvioida, että höyrynjäähdyttimen detajisuunnitteluun käytetty aika projektia kohden putoaa noin 150:stä noin 30 tuntiin.

Muina hyötyinä voidaan pitää informaation lisääntymistä. Koska kaikki mahdolliset tuotevariantit ovat tiedossa, voidaan jäähdyttimien tuotetietoa tuottaa etukäteen ennen projekteja. Tämä tarkoittaa esimerkiksi tarvittavien materiaalien määrän, tuoteyksilöiden massan ja muiden fyysisten mittojen laskemista. Näitä tietoja voidaan hyödyntää esimerkiksi voimalaitoksen layout-suunnittelussa ja materiaalien tilaamisessa. Jokaiselle tuoteyksilölle voidaan myös laskea materiaali ja työkustannukset ennen valmistusta. Tämä helpottaa esimerkiksi tarjousten tekemistä ja kustannusten hallintaa. Aiemmissa projekteissa nämä tiedot ovat olleet saatavilla vasta projektin myöhäisessä vaiheessa, sillä tyyppillisesti jäähdyttimet suunnitellaan projektien loppupuolella.

6.3 Jatkoimenpiteet

Tuoteinsinöörien käytössä olevat suunnitteluohjeet tulee päivittää uuden tuoterakenteen mukaiseksi. Nykyiset suunnitteluohjeet tarjoavat ratkaisuja, jotka eivät sellaisinaan ole yhteensopivia uuden tuotemäärittelyn kanssa. Nykyisiä suunnitteluohjeita hyödynnettäessä tuoteinsinööri joutuu sovittamaan suunnitteluohjeen tarjoamat ratkaisut uuden tuotemäärittelyn mukaiseksi. Lisäksi tulee huolehtia tuoteinsinöörien ja projekti-insinöörien perehdyttämisestä uuteen tuoterakenteeseen ja sen vaikutuksista tuotteen muuttujien arvojen valintaan. Höyrynjäähdyttimistä tulee tehdä sisäinen standardi, jossa kuvataan jäähdyttimien tuoterakenne.

Ensimmäiset projektit, joissa käytetään uuden tuoterakenteen mukaisia höyrynjäähdyttimiä, ovat jo käynnissä. Projektien aikana ja niiden valmistuttua tuote- ja suunnitteluinsinööreiltä kerätään kommentteja ja havaintoja höyrynjäähdyttimiin liittyen. Mikäli tarvetta ilmenee, voidaan tuotemäärittelyä tai suunnitteluautomaattia muuttaa vastaavasti.

Kuten aiemmin mainittiin, ainutlaatuisten muuttujien arvojen ratkaisujoukkoja voitaisiin pyrkiä pienentämään. Jäähdyttimen toimintaa tulisi arvioida kriittisesti ja vähentää vaihtoehtojen määrää siten, että jokainen vaihtoehto tuo selkeää hyötyä tuotteen toiminnallisuuteen muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Yrityskulttuurin ja totuttujen toimintatapojen takia vaihtoehtojen määrän vähentäminen on haastava työ. Tämän työn kaltaisia kehitysprojekteja on yrityksessä käynnissä tällä hetkellä useita, joten edellytykset asenteiden muuttumiselle ovat olemassa.

7 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli kehittää Metso Power Oy:n höyryjäähdyttimen tuoterakennetta siten, että höyryjäähdyttimen tuoteyksilöt voidaan muodostaa etukäteen suunniteltuja ratkaisuja käyttäen konfigurointiprosessin avulla. Tällä pyrittiin nopeuttamaan tuoteyksilön suunnittelua ja pienentämään suunnittelun kustannuksia.

Höyryjäähdyttimen rakenteeseen vaikuttavat muuttujat jaettiin ainutlaatuisiin ja yhteisiin muuttujiin. Ainutlaatuisiksi muuttujiksi valittiin höyryjäähdyttämisen kannalta oleelliset muuttujat sekä muuttujat, joiden arvot riippuvat höyrykattilan muista osista. Yhteisten muuttujien arvot määräytyvät tuoterakenteen mukaisesti ainutlaatuisten muuttujien arvojen perusteella. Tuoteyksilön muodostamiseen tarvittavien lähtötietojen määrä saatiin vähenemään noin 30:stä alle kymmeneen. Lähtötietojen määrän väheneminen helpottaa ja nopeuttaa tuotteen suunnitteluprosessia.

Ainutlaatuisille muuttujille kehitettiin diskreettejä arvoja sisältävät ratkaisujoukot. Aiemmin arvot olivat valittavissa täysin vapaasti tietyn alueen sisältä tai arvolle oli määriteltävä vain minimi- tai maksimiarvo. Ratkaisujoukkojen arvot määritettiin siten, että jokainen arvo tuo tuotteen toiminnallisuuteen merkityksellisen eron muihin arvoihin verrattuna. Ratkaisujoukkojen rajaaminen vähentää tuotevarianttien lukumäärää ja helpottaa tuotekonfigurointia.

Konfigurointiprosessia varten rakennettiin tuotekonfiguraattori. Yrityksessä konfiguraattoreita kutsutaan suunnitteluautomaateiksi. Lähtötietojen perusteella suunnitteluautomaatti muokkaa jäähdyttimen 3D-mallin vastaamaan tarvittavaa tuoteyksilöä. Työpiirustukset päivittyvät automaattisesti 3D-mallin muutosten mukaan. Suunnitteluautomaatin tuloksena syntyvät siten tuoteyksilöä kuvaava 3D-malli, työpiirustukset sekä osaluettelot.

Diplomityön avulla onnistuttiin nopeuttamaan höyryjäähdyttimen suunnitteluprosessia merkittävästi. Lähtötilanteessa yhteen höyrykattilaan tarvittavien höyryjäähdyttimien detaljisuunnitteluun kuluu aikaa noin 150 tuntia. Yrityksessä tehdyn arvion mukaan kehitystyön ansiosta detaljisuunnitteluun tarvitaan jatkossa noin 30 tuntia. Käyttökokemusten perusteella tuotemäärityä tai suunnitteluautomaattia voidaan vielä kehittää tulevaisuudessa. Erityisen mielenkiinnon kohteena ovat ainutlaatuisten muuttujien ratkaisujoukkojen pienentäminen. Näin voitaisiin vähentää tuotevarianttien lukumäärää ja pienentää höyryjäähdyttimiin liittyviä kustannuksia edelleen.

LÄHTEET

Ammar-Khodja, S., Perry, N. & Bernard, A. Processing Knowledge to Support Knowledge-based Engineering Systems Specification. *Concurrent Engineering: Research and Applications* 16, 1(2008), pp. 89–101

Butz, A., Fisher, B., Krüger, A. & Oliver, P. Smart Graphics – 5th International Symposium, SG 2005 Frauenwörth Cloister, Germany, August 22-24, 2005 Proceedings, Germany 2005, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 229 p.

Caron, F. & Fiore, A. ‘Engineer to order’ companies: how to integrate manufacturing and innovative processes. *International Journal of Project Management* 13(1995)5, pp. 313–319.

Duray, R., Ward, P.T., Milligan, G.W. & Berry W.L. Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. *Journal of Operations Management* 18(2000), pp. 605–625

Eteläaho, R. HYBEX = Metso BFB. 2012. Julkaisematon lähde. 37s.

Haug, A., Ladeby, K. & Edwards, K. Reflections on the transition from ETO to Mass Customization. *Proceedings of the 2007 World Conference on Mass Customization and Personalization*, Tuesday, Cambridge, Boston, USA, October 7-9, 2007.

Heino, T. Recommended En-headers. 2011. Julkaisematon lähde.

Hicks, C., McGovern, T. & Earl, C.F. Supply chain management: A strategic issue in engineer to order manufacturing. *International Journal of Production Economics* 65(2000), pp. 179–190

Hvam, L., Mortensen, N.H. & Riis, J. *Product Customization*. Heidelberg 2008, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 283 p.

Juuti, T., Lehtonen, T., Using multiple modular structures in delivering complex products. *Proceedings of NordDesign 2006*, University of Iceland, Reykjavik, 2006

Kovse, J., Härder, T. & Ritter, N. 2002. Supporting Mass Customization by Generating Adjusted Repositories for Product Configuration Knowledge. *Proceedings of the International Conference CAD 2002: Corporate Engineering Research*, Dresden, Germany, March 4-5, 2002. pp. 17–26

Lehtonen, T. 2007. Designing Modular Product Architecture in the New Product Development. Dissertation. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu - Tampere University of Technology. Publication 713. 220 p.

Luomaharju, T. CYMIC = Metso CFB. 2012. Julkaisematon lähde. 39s.

Metso 2012 – vuosiesite [raportti]. [viitattu 01.05.2013]. Saatavissa: http://www.metso.com/reports/2012/assets/files/PDF/download_center/metso_annual_review_2012_finnish.pdf

Metso Power [a]. Design sheet of steam attemperator. Julkaisematon lähde

Metso Power [b]. Materials of attachments, furnace and second pass. Julkaisematon lähde.

Metso Power [c] – Yrityspresentaatio 2012. Julkaisematon lähde. 22 s.

Mäkipää, M., Paunu, P. & Ingalsuo, T. Utilization of Design Configurators in Order Engineering. International Journal of Industrial Engineering and Management 3(2012)4, pp. 223–231

Myung, S. & Han, S. Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method. International Journal of Expert Systems with Applications 21 (2001) pp. 99–107

Pahl, G. & Beitz, W. 1990. Koneensuunnitteluoppi. Helsinki, Metalliteollisuuden kustannus. 608 s.

Peltonen, H., Martio, A. & Sulonen, R. 2002. PDM – Tuotetiedon hallinta. Helsinki, Edita Prima Publishing 169 s.

Pulkkinen, A. 2007. Product Configuration in Projecting Company: The Meeting of Configurable Product Families and Sales-Delivery Process. Dissertation. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu - Tampere University of Technology. Publication 712

Sandberg, M. Knowledge Based Engineering – In Product Development. Luleå Sweden 2003, Luleå University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering Division of Computer Aided design, pp. 15.

Scallan, P. Process Planning The Design/Manufacture Interface. Oxford 2003, Butterworth-Heinemann. 483 p.

- Simpson, T.W., Siddique, Z. & Jiao, J. 2006. Product Platform and Product Family Design Methods and Applications. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 548 p.
- Skjelstad, L., Hagen, I. & Alfnes, E. 2005. Guidelines for achieving a proper mass customisation system. Proceedings of the EurOMA International Conference on Operations and Global Competitiveness, Budapest, Hungary, 19-22.6.2005 pp. 1565–1572
- Stevenson, W.J. Operations Management. 8th Edition, New York 2005, Tata McGraw Hill Education. 794 p.
- Stultz, S.C. & Kitto, J.B. Steam: its generation and use. 40th edition. Barberton 1992, The Babcock & Wilcox Company.
- Tiihonen, J. 1998. Kansallinen konfigurointikarointus – Asiakaskohtainen muuntelu suomalaisessa teollisuudessa. Lisensiaatintyö. Teknillinen korkeakoulu, Helsinki. 193s.
- Tseng, M.M. & Piller, F.T. The Customer Centric Enterprise Advances in Mass Customer and Personalization. Heidelberg 2003, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 535 p.
- Ulrich, K. & Tung, K. Fundamentals of product modularity, DE-Vol. 39, Issues in Design/manufacture Integration, ASME, New York, 1991.
- Victor, B. Boynton, A.C. Invented Here: Maximizing Your Organization's Growth and Internal Profitability. Harvard Business School Press, June 1998. 272 pp.
- Whitney, D.E. 2004 Mechanical Assemblies - Their Design, Manufacture and Role in Product Development. Oxford University Press. 432 p.