



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

HIEKKALUKON PAINELAITEMITOITUS

Antti Merikoski

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2016
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys



ALKUSANAT

Opinnäytetyö tehtiin Valmet Technologies Oy:lle painerunko-osaston tuotekehitystyö tarpeisiin. Sain työn kautta paljon oppia painerunkojen erilaisista mitoitusavoista, lainsäädännöstä ja tuotteiden kehittämisestä. Ymmärrys kasvoi koko prosessin ajan.

Haluan kiittää esimiestäni diplomi-insinööri Jukka Ylitaloa mielenkiintoisen aiheen antamisesta ja koko painerunko-osaston tiimiä vinkeistä ja avusta opinnäytetyöprosessin aikana. Aiheen sisäistämisessä ja ongelmakohtien ratkaisemisessa heidän apunsa oli korvaamatonta. Tampereen ammattikorkeakoulun puolelta haluan kiittää opinnäytetyöohjaajaani diplomi-insinööri Harri Laaksosta käytännön asioiden neuvomisessa. Suuri kiitos kuuluu myös läheisilleni tuesta ja kannustuksesta opintojeni loppuun saattamisessa. Uudet haasteet odottavat.

Tampereella 20.3.2016

Antti Merikoski

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotekehitys

MERIKOSKI, ANTTI:
Hiekkalukon painelaitemitoitus

Opinnäytetyö 76 sivua, joista liitteitä 5 sivua
Maaliskuu 2016

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli laatia Valmetin CYMIC-höyrykattilatyyppin hiekkalukkokomponentille paineraja-, materiaali- ja putkiseinämämäärittelyt. Tavoitteena oli työ, jossa tehtiin eurooppalaisen EN-vesiputkikattilastandardin ja amerikkalaisen ASME-painelaitetekoodin mukaiset laskennat hiekkalukkokomponentin vakioimiseksi. Sopivien putkimateriaalien ja seinämien löytämiseksi käytettiin yrityksen omia laskentaohjelmia, iterointimenettelyä ja optimointia eri näkökulmista. Lisäksi tavoitteena oli tutkia tarkastuslaitoksille lähetettävän vakiodokumentaation kehittämistä.

Kehitystyön tuloksena hiekkalukolle löydettiin sopivat EN- ja ASME -laskelmiin pohjautuvat painerajat, sekä putkimateriaalit ja -seinämät. Kriittisimmäksi kohdaksi osoitettiin pitkittäisellä jaolla olevat kammion aukot, mutta lopullisten painerajojen muodostumiseen vaikuttivat myös muut hiekkalukon putkikombinaatiot. Optimointia tehtiin muun muassa lujuuden, kilohinnan ja monikäyttöisyyden mukaan sekä aikaisempien projektien pohjalta. Standardisoidulle hiekkalukolle saatiin lisäksi tehtyä EN:n ja ASME:n mukaiset laskentapohjat vakiodokumentaation helpottamiseksi.

Jatkossa käytettävä standardisoitu hiekkalukko tulee nopeuttamaan ja helpottamaan kattilarakenteiden painerungon suunnittelua sekä vähentämään virheiden määrää. Kyseisellä ratkaisulla varsinkin suunnittelu- ja valmistuskustannuksia saadaan ratkaisevasti alennettua ja samalla laatua parannettua. Näin ollen painerungon mitoituksessa voidaan keskittyä haasteellisempiin kohteisiin. Myös muita painerungon kohteita kannattaa jatkossa vakioida ja dokumentaatiota on myös mahdollista kehittää. Opinnäytetyöstä on poistettu luottamuksellinen aineisto.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Product Development

MERIKOSKI, ANTTI:
Dimensioning of the Loopseal Pressure Component

Bachelor's thesis 76 pages, appendices 5 pages
March 2016

The purpose of this thesis was to find pressure limits for the Valmet CYMIC steam boiler's loopseal pressure component. This was done by making pipe material and pipe size specifications for the component. The work was a part of the standardization processes that are made in Valmet. The study was done by using the European EN water pipe boiler standard and the American ASME pressure vessel code for calculations. Methods that were used were iteration and optimization through Valmet calculation programmes and for instance weight analysis. One goal was also to develop the calculation documents required by the governmental authorities for approval purposes.

As a result the pressure limits, pipe materials and pipe sizes were found for both EN and ASME cases. The most critical case which appeared in the calculations was longitudinal pitch between holes. Still the pressure limits were mainly found by other criteria. The things that mattered were strength of the pipes, weight, welding opportunities and usage in other areas of the pressure structure. The optimization work was done by these findings and different pipe combinations were chosen. The development goals for the calculation documents were also reached. As a result mock-up documents were made for EN and ASME cases.

The findings indicate that the standardized loopseal pressure component will make design work faster and easier. The development costs and manufacturing costs will be lower. Still the quality will be higher because of the standardized solution. This way it is also possible to concentrate to designing that take more time and work. Further research for this kind of activities can be done to make designing and documenting even more efficient. The parts that are confidential are deleted from the thesis.

Key words: loopseal, pressure component, steam boiler, EN-standard, ASME-code

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	10
2	YRITYS.....	11
	2.1 Valmet Technologies Oy	11
	2.2 Liiketoiminta ja markkina-asema	11
	2.3 Historia.....	12
3	LIIKETOIMINTALINJAT, TUOTTEET JA PALVELUT.....	14
	3.1 Yleistä	14
	3.2 Paperit -liiketoimintalinja	14
	3.3 Sellu ja energia -liiketoimintalinja.....	15
	3.4 Automaatio-liiketoimintalinja.....	15
	3.5 Palvelut-liiketoimintalinja.....	16
4	HYBEX-, CYMIC- JA RECOX -KATTILAT	17
	4.1 Leijupolttoon perustuvat höyrykattilat.....	17
	4.2 HYBEX -kattila	18
	4.3 CYMIC -kattila	19
	4.4 CYMIC -kattilan kuumakierto.....	20
	4.5 RECOX -kattila.....	21
5	PAINELAITTEET JA LAINSÄÄDÄNTÖ	23
	5.1 Painelaitteiden määritelmä ja kattilarakenteen painerunko	23
	5.2 Painelaitedirektiivi PED97/23EY	23
	5.3 Vesiputkikattilastandardi EN-12952.....	24
	5.4 ASME -painelaittekoodi	25
	5.5 ASME-materiaalit	27
6	PAINELAITTEIDEN MITOITUS.....	28
	6.1 Peruslujuusopillinen lähestyminen	28
	6.2 Standardien merkitys	30
	6.2.1 Vesiputkikattilastandardi EN-12952 mitoituksessa	30
	6.2.2 ASME-painelaittekoodi mitoituksessa.....	31
7	EN-STANDARDIN MUKAINEN MITOITUS	32
	7.1 Laskentapaine-, lämpötila ja suunnittelujännitys.....	32
	7.2 Suorat ja taivutetut putket	33
	7.3 Yhteet lieriössä ja kammiossa.....	35
	7.4 Yksittäiset ja vierekkäiset yhteet	36
	7.5 Päädyt.....	38
8	ASME-KOODIN MUKAINEN MITOITUS	41
	8.1 Laskentapaine-, lämpötila ja suunnittelujännitys.....	41

8.2	Suorat ja taivutetut putket	42
8.3	Kammioiden reikäkentät	43
8.4	Pinta-alakompensointilaskenta	45
8.5	Päädyt.....	48
9	KONFIGUROIDUN HIEKKALUKON LASKENTA	49
9.1	Hiekkalukon rakenne	49
9.2	Hiekkalukon konfigurointi.....	50
9.3	EN- ja ASME -materiaalien ja putkikokojen optimointi	51
9.4	Laskentaohjelmat	54
9.5	EN -laskentatapaukset.....	55
9.6	ASME -laskentatapaukset.....	56
10	PAINERAJOJEN MÄÄRITYS	57
10.1	Painerajojen määräytyminen EN -vesiputkikattilastandardissa.....	57
10.1.1	Painerajan 149 bar:a määräytyminen	59
10.1.2	Painerajojen 175 bar:a ja 199 bar:a määräytyminen	60
10.1.3	Vahvistavien pituuksien l_{rs} ja l_{rb} tarkastelu	60
10.2	Painerajojen määräytyminen ASME -painelaitetekoodissa.....	62
10.2.1	Painerajan 175 bar:a määräytyminen	63
10.2.2	Painerajan 185 bar:a määräytyminen	64
11	VAKIODOKUMENTAATION KEHITTÄMINEN	66
11.1	Lähtökohta	66
11.2	Vaihtoehdot.....	66
11.3	Mallidokumentti.....	67
11.3.1	Mallidokumentin rakenne	67
11.3.2	Mallidokumentin käyttäminen	68
12	POHDINTA.....	69
	LÄHTEET	70
	LIITTEET	72

LYHENTEET JA TERMIT

σ_r	synterikuoren säteensuuntainen jännitys
σ_φ	synterikuoren tangentiaalinen jännitys
σ_z	synterikuoren pituussuuntainen jännitys
p	kaasun tai nesteen paine
t	paineastian seinämnpaksuus
l	paineenalaisen osuuden pituus
d	synterikuoren sisähalkaisija
τ_{max}	maksimileikkausjännitys
$\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$	pääjännitykset
σ_{vert}	vertailujännitys
p_c	laskentapaine
t_c	laskentalämpötila
f	suunnittelujännitys
p_d	suunnittelupaine
PS	sallittu paine
p_{st}	hydrostaattinen paine
t_{or}	vertailulämpötila
K	materiaalin lujuusarvo
S	varmuuskerroin
R_{m20}	murtolujuus huoneen lämpötilassa (20 °C)
R_{eHtc}	ylempi myötöraja laskentalämpötilassa
$R_{p0,2tc}$	0,2 % venymisraja laskentalämpötilassa
R_{mTtc}	virumismurtolujuus eliniälle laskentalämpötilassa
T	määritelty kattilan elinikä
e_{ct}	suoran putken vaadittu seinämnpaksuus
d_o	putken nimellinen ulkohalkaisija
e_t	vaadittu seinämnpaksuus lisät mukaan lukien
c_1	valmistuksen sallittu alitoleranssi
c_2	korroosiovara
r_b	putken keskilinjan taivutussäde
v	lujuuskerroin
v_b	yksittäisen yhteen lujuuskerroin

v_m	vierekkäisten yhteiden lujuuskerroin
d_{os}	runkoputken ulkohalkaisija
d_{is}	runkoputken sisähalkaisija
l_{rs}	runkoputken vahvistava pituus
l_{rb}	yhdeputken vahvistava pituus
e_{rs}	runkoputken seinämänpaksuus
d_{ob}	liitettävän putken suurin ulkohalkaisija
e_{ch}	seinämänpaksuus tasaisessa levypäädysssä
e_{chl}	seinämänpaksuus levypäädyn uran pohjalla
C_1, C_2, C_3	levypäädyn muoto- ja suunnittelukertoimet
R_{ik}	levypäädyn kevennysuran sisäsäde
P	suurin sallittu työpaine
S	suurin sallittu suunnittelujännitys
t	seinämän vähimmäispaksuus, seinämän nimellismitta
D	sylinterin ulkohalkaisija
w	hitsiliitoksen lujuuskerroin
e	paksuuslisä mankeloitaville putkille
E	lujuuskerroin
y	lämpötilakerroin
C	paksuuslisä kierteitettävälle putkille, päädyn liitännän kerroin
R	sylinterin sisäsäde
d_{max}	aukon maksimihalkaisija
K	PD/1.82St, max 0.990
ID	sylinterin sisähalkaisija
E_1, E_2, E_3	lujuuskertoimet
d	aukon keskihalkaisija
p	aukkojen pitkittäissuuntainen välimatka
p'	aukkojen diagonaalinen välimatka
p_c	aukkojen kehän suuntainen välimatka
θ	kehällä olevien aukkojen välinen kulma
t_n	yhteen seinämänpaksuus
t_e	vahvistuslevyn paksuus
t_r	kammion vaadittu paksuus
F	kerroin, joka huomioi aukon tarkastelusuunnan
A_1	kompensointipinta-ala runkoputkessa

A_2	kompensointipinta-ala yhteessä
A_3	yhteen vaipan sisään menevän osan vahvistava ala
A_4	hitsisauman vahvistava ala
A	tarvittava kompensointi ala
t_m	vaadittu seinämänpaksuus saumattomassa yhdeputkessa
t_e	vahvistavan elementin paksuus
f_{r1}, f_{r2}	S_n/S_v eli yhteen ja runkoputken jännitysten suhde
WL_1	hitsisauman pituusmitta

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kehittää Valmet Technologies Oy:n CYMIC-mallisen kiertoleijukattilan hiekkalukkokomponenttia. Työssä tutkitaan eri putkikokovaihtoehtoja ja putkimateriaaleja hiekkalukon vakioimiseksi. Yrityksessä tehdään jatkuvasti kehitystyötä uuden mallisten komponenttien suunnittelun osalta. Tavoitteena on vähentää ylimääräisiä työvaiheita niin suunnittelussa kuin valmistuksessa. Valmiiksi suunnitelluilla ratkaisuilla voidaan parantaa tuotteiden laatua, vastata paremmin asiakkaan vaatimuksiin ja lisätä kustannustehokkuutta.

Hiekkalukko-komponentti on keskeinen osa kiertoleijukattilan kiertoprosessia. Kattilan tulipesässä poltetaan kiinteää ainesta eivätkä kaikki partikkelit vielä pala tässä vaiheessa. Muodostuneet savukaasut ja palamattomat kiintoainepartikkelit kulkeutuvat ensin sykloniin, jossa syklonin sisäinen pyörre erottaa savukaasut takavetoon. Partikkelit kulkeutuvat puolestaan alas hiekkalukkoon. Hiekkalukko palauttaa kiintoaineen takaisin tulipesän pohjalle ja estää samalla savukaasujen virtauksen prosessin kannalta väärään suuntaan.

Opinnäytetyön tavoitteena on laatia sekä EN-vesiputkikattilastandardin että ASME-painelaittekoodin mukaiset määrittelyt hiekkalukon materiaaleille, putkien kokoluokille ja painerajoille. Menetelminä käytetään yrityksen omia laskentaohjelmia, iterointia ja optimointia. Näiden määrittelyjen pohjalta voidaan toteuttaa suunnittelukonfiguraattori, jolla voidaan projektikohtaisesti valita hiekkalukolle sopiva kokoluokka. Näin esisuunnittelun aikaista lujuuslaskentaa ei tarvita. Tarkastuslaitoksia ja kattilan tilaajaa varten tarvitaan kuitenkin komponenttikohtaiset lujuuslaskelmadokumentit, joiden kehittämistä myös tutkitaan.

Kehitystyössä tarkastellaan kattilarakenteita, painelaitteiden erilaisia mitoitus tapoja ja saatuja tuloksia. Aikaisempia projekteja on tehty lukuisia, joten tietoa putkien materiaaleista ja putkien kokoluokista on jo hyvin olemassa. Eri putkikombinaatioiden suuri määrä luo kuitenkin omat haasteensa sopivien painerajojen löytämiseen.

2 YRITYS

2.1 Valmet Technologies Oy

Valmet Technologies Oy on suomalainen teknologia-alan yritys, joka tarjoaa ratkaisuja pääsääntöisesti sellu-, paperi- ja energia-alan toimijoille. Valmetin tuote- ja palveluvalikoimiin kuuluvat uusien koneiden, tuotantolaitosten ja prosessijärjestelmien toimitukset sekä jälleenrakentamishankkeet ja näihin liittyvät palvelut. Kestävään kehitykseen pohjautuvat nykyaikaiset ratkaisut ennen kaikkea biomassan käsittelyn osalta ovat Valmetin ydinosaamista. Valmet työllistää noin 12 000 työntekijää 33:ssa eri maassa ja yrityksen liikevaihto oli vuonna 2014 2,5 miljardia euroa. (Valmet Technologies Oy: About Us 2016)

2.2 Liiketoiminta ja markkina-asema

Valmet Technologies Oy on jakautunut neljään eri liiketoimintalinjaan, joita ovat palvelut-, automaatio-, sellu- ja energia- sekä paperit -linja. Valmet toimii laitevalmistajana ja palvelujen tuottajana viidellä määrittelemällään markkina-alueella. Näitä ovat Pohjois-Amerikka, Etelä-Amerikka, EMEA eli Eurooppa, Lähi-Itä ja Aasia, Kiina sekä Aasian Tyynenmeren -alue (kuvio 1). Tyypillisiä asiakkaita ovat monet kansainväliset yritykset kuten Fortum, Veolia, Borealis ja UPM. (Valmet Technologies Oy: About Us 2016)



KUVIO 1. Valmetin toimipisteet (Valmet Technologies Oy: About Us 2016)

Valmet on vahvassa markkina-asemassa kaikilla liiketoiminta-alueillaan ja yksi alan suurimpia toimijoita. Kansainvälisiä kilpailijoita ovat muun muassa Andritz ja Foster Wheeler. Menestyksen takana on pitkä yli 200-vuotinen historia ja organisaatorakenteen kehitys näiden vuosien aikana. Valmetin strategiana on kehittää ja toimittaa kilpailukykyisiä teknologioita ja palveluja sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle. Valmet on ennen kaikkea sitoutunut asiakkaan suorituskyvyn parantamiseen (kuvio 2). Mottona onkin ”Forward”, jonka on tarkoitus näkyä kaikessa Valmetin toiminnassa ja ajattelussa. (Valmet Technologies Oy: About Us 2016)



KUVIO 2. Valmetin tarjonta asiakkaille (Valmet Technologies Oy: About Us 2016, muokattu)

2.3 Historia

Valmetilla on yli 200 vuoden teollisuushistoria, jonka juuret ulottuvat 1750-luvulle. Suomenlinnassa aloitti toimintansa laivanrakennustelakka, joka siirtyi myöhemmin Suomen valtion metalliyhtiöiden omistukseen ja tuli lopulta osaksi Valmetia. Varhaista historiaa on myös Tamfeltin Jokioisten Verkatehdas, joka perustettiin vuonna 1797. Tehtaassa valmistettiin erilaisia tekstiilejä ja myöhemmin siitä kehittyi merkittävä teknisten tekstiilien toimittaja maailmassa. Myös monet muut yritykset, jotka aloittivat toimintansa jo 1800-luvulla, ovat nykyään osa Valmetia. Näitä ovat muun muassa Karlstad Mekaniska Werkstad, Beloit Corporation ja Sunds Bruk. (Valmet Technologies Oy: About Us 2016)

Vuonna 1951 valtion omistamista metallitehtaista tuli Valmet Oy. Yhtiön tuotevalikoimaan kuuluivat muun muassa veturit, traktorit, hissit, aseet, laivat ja lentokoneet. Paperikoneiden valmistuksen aloittaminen 1950-luvun alussa nousi kuitenkin nopeasti kansainvälisesti merkittäväksi toiminnaksi. Valmet luopuikin monien muiden tuotteiden valmistuksesta vähitellen 1980- ja 1990 -luvuilla. Näihin aikoihin Valmet teki myös merkittäviä yritysostoja paperikonetoimintaan liittyen. (Valmet Technologies Oy: About Us 2016)

Vuonna 1999 Valmet ja Rauma fuusioituivat ja yrityksen nimeksi tuli alkunimeämisen Valmet-Rauma Oyj:n jälkeen Metso Oyj. Rauman toiminta keskittyi kivenmurskaukseen, virtaussäätöihin ja kuituteknologiaan, ja näin syntyi globaali prosessiteollisuutta palveleva yritys. 2000-luvulla Metso osti muun muassa Beloit Corporation:n paperinvalmistusteknologian, Aker Kvaerner ASA:n Pulping- ja Power -liiketoiminnot ja Tamfelt Oyj:n. Sellu- ja paperiteollisuuden laitetoimittajana osaaminen laajeni voimantuotantoon ja biomassateknologioihin. (Valmet Technologies Oy: About Us 2016)

Vuonna 2013 Metso Oyj jakautui kuitenkin kahdeksi erilliseksi yhtiöksi, Metso Oyj:ksi ja Valmet Oyj:ksi. Tällöin sovittiin Metso Oyj:n liiketoiminnan muodostuvan kaivos- ja maanrakennustoiminnasta ja Valmet Oyj:n liiketoiminnan massa, paperi ja voimantuotannosta. Viimeisimpänä kauppana vuonna 2015 Valmet osti prosessiautomaatiojärjestelmät Metsolta, mikä täydensi Valmetin yrityskuvaa prosessilaittevalmistajana. (Valmet Technologies Oy: About Us 2016)

3 LIIKETOIMINTALINJAT, TUOTTEET JA PALVELUT

3.1 Yleistä

Valmetin neljä eri liiketoimintalinjaa tarjoavat laajan valikoiman erilaisia tuotteita ja palveluita. Päämääränä on tuottaa uudistuvista raaka-aineista ympäristöystävällisiä lopputuotteita. Raaka-aineita ovat esimerkiksi metsien puut ja hake, maataloustuotteet ja jäteaines. Näistä saadaan kehittyvien teknologioiden avulla tuotettua erilaisia biopolttoaineita ja -materiaaleja, sellua, paperia, kartonkia ja lämpö- sekä sähköenergiaa. Mahdollisuuksia on monia ja tutkimustyötä tehdään jatkuvasti. (Valmet Technologies Oy: Products 2016)

3.2 Paperit -liiketoimintalinja

Paperiteknologioilla on Valmetilla vahva perusta ja Valmet on toimittanut historiansa aikana yli 1600 kartonki- ja paperikonetta ympäri maailmaa. Valmet tarjoaa kokonaisia kartongin- ja paperin- sekä pehmopaperintuotantolinjoja, joihin kuuluvat erilaiset modularisoidut konekokonaisuudet (kuva 1). Vanhoja koneita voidaan myös modernisoida ja tuotantokapasiteettia kasvattaa. (Valmet Technologies Oy: Products 2016)



KUVA 1. OptiConcept M -paperikonelinja (Valmet Technologies Oy: Media gallery 2016)

3.3 Sellu ja energia -liiketoimintalinja

Sellu- ja energiatekniikat voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään, joita ovat selluntuotanto talteenottojärjestelmineen, energian tuotanto sekä biotekniikat. Selluntuotanto ja talteenottojärjestelmät käsittävät erilaisia teknisiä ratkaisuja puunkäsittelyyn, keittämiseen, sellun kuivaamiseen ja haihduttamisprosessiin liittyen. Energiantuotannossa ydinosaamista ovat kuplivaan ja kiertävään leijuteknologiaan perustuvat kattilat (kuva 2), biomassan ja jätteen kaasuttaminen, öljy- ja kaasukattilat sekä ilmansaasteiden puhdistusjärjestelmät. Erilaisia bioteknologioita kehitetään jatkuvasti ja tällä hetkellä tutkitaan muun muassa pyrolyysitekniikan tarjoamia mahdollisuuksia bioöljyn tuottamiseen. (Valmet Technologies Oy: Products 2016)



KUVA 2. CYMIC-kiertoleijukattila Stora Enso Langerbruggen (Valmet Technologies Oy: Media gallery 2016)

3.4 Automaatio-liiketoimintalinja

Automaatoratkaisut ovat Valmetin uusinta osaamisaluetta ja tärkeä osa prosessien kokonaisuhoitoa. Valmetin automaatiotarjontaan kuuluvat hajautetut prosessinhallintajärjestelmät, laatusäätöjärjestelmät, analyysatorit, kamerajärjestelmät ja erilaiset palveluratkaisut. Automaatiojärjestelmiä tarjotaan osana laitoksien ja koneiden hallintaa muun muassa massa- ja paperiteollisuudelle, energiantuotantoon ja meriteollisuuteen. (Valmet Technologies Oy: Products 2016)

3.5 Palvelut-liiketoimintalinja

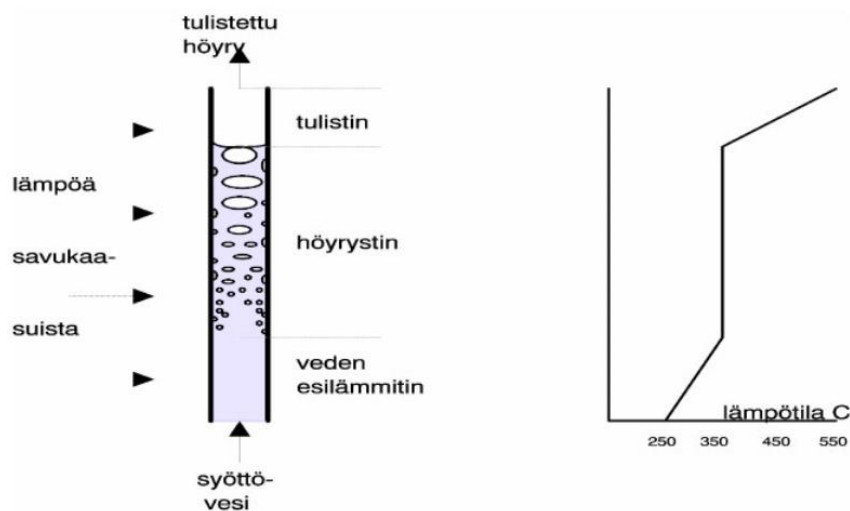
Palvelut ovat tärkeä osa Valmetia tarjoten kone- tai laitoskokonaisuuden koko eliniän kestäviä palveluja. Tuotantolaitosten uudistukset, kapasiteetin kasvattaminen, vara-, kulutus- ja vaihto-osat sekä huolto kuuluvat osakokonaisuuksina palvelusektoriin. Tarjottavia tuotteita ovat myös paperikonekudokset, suodatinkankaat ja esimerkiksi paperikoneiden telapalvelut. Valmetin asiakkaina on yli 2000 laitoskokonaisuuden käsittävää sellu- ja paperitehdasta ympäri maailmaa. (Valmet Technologies Oy: Products 2016)

4 HYBEX-, CYMIC- JA RECOX -KATTILAT

4.1 Leijupolttoon perustuvat höyrykattilat

Sellu- ja energialiiketoimintalinjan kolme pääkattilatyyppeä, joita asiakkaille toimitetaan, ovat HYBEX, CYMIC ja RECOX. Kaikki kattilatyypit ovat luonnonkierrossa olevia leijupolttoon perustuvia höyrykattiloita. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016) Leijupoltto on syrjäyttänyt useissa yli 10 MW:n polttolaitoksissa arinapolttotekniikan, jossa polttoainetta poltetaan perinteisemmin usein mekaanisesti liikuteltavan arinan päällä. Leijupolttotekniikassa polttoainetta poltetaan ilmapvirran leijuttamassa hiekkapatjassa, jolloin kiinteitä polttoaineita voidaan polttaa ympäristöystävällisesti ja hallitusti. Leijupolttoon perustuvia kattiloita ovat leijukerros- ja kierto-leijukattilat. (Työterveyslaitos 2011, 9-10)

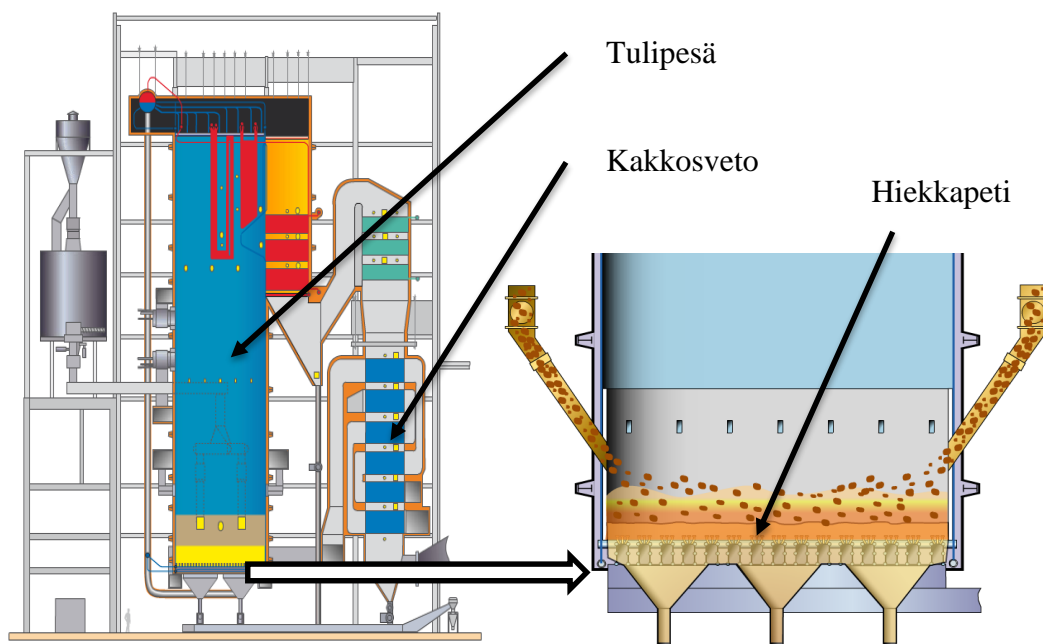
Höyrykattiloiden pääasiallinen tehtävä on tuottaa kattilaan syötetystä vedestä höyryä. Syöttövesipumpulta tuleva vesi johdetaan ensin syöttöveden esilämmittimelle ja tästä kattilan lieriölle, josta vesi siirtyy kattilarakenteen pohjalle. Höyrystimen kautta kulkeva vesi höyrystyy vähitellen tulipesässä syntyvien kuumien savukaasujen ansiosta ja nousee ylöspäin takaisin lieriölle. Lieriö erottaa kylläisen höyryn vedestä edelleen tulistettavaksi. Veden ja höyryn luonnonkierto perustuu tiheyseroon kylläisen höyryn ja vesihöyryseoksen välillä. Ilmiötä ja lämpötilan muutosta vesihöyrypiirissä havainnollistaa kuvio 3. (KnowEnergy: Höyrykattilan periaate 2016)



KUVIO 3. Höyrykattilan toimintaperiaate (KnowEnergy: Höyrykattilan periaate 2016)

4.2 HYBEX -kattila

HYBEX -kattila on Valmetin tuotenimi BFB -tyyppiselle kattilalle, joka perustuu kupli-vaan leijupoltteknologiaan, ”bubbling fluidized bed”. Tuotenimi HYBEX tulee Valmetin teknisestä ”hydro beam floor” -innovaatiosta, joka mahdollistaa palamattoman materiaalin poistumisen tulipesästä tehokkaasti. HYBEX -kattilamalleja on tarjolla useita ja ne voivat olla joko päältä tai alta tuettuja. Kuviossa 4 on yleisimmin käytössä oleva päältä tuettavan BFB -kattilarakenteen ja tulipesän leijupedin sivukuvanto. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016)



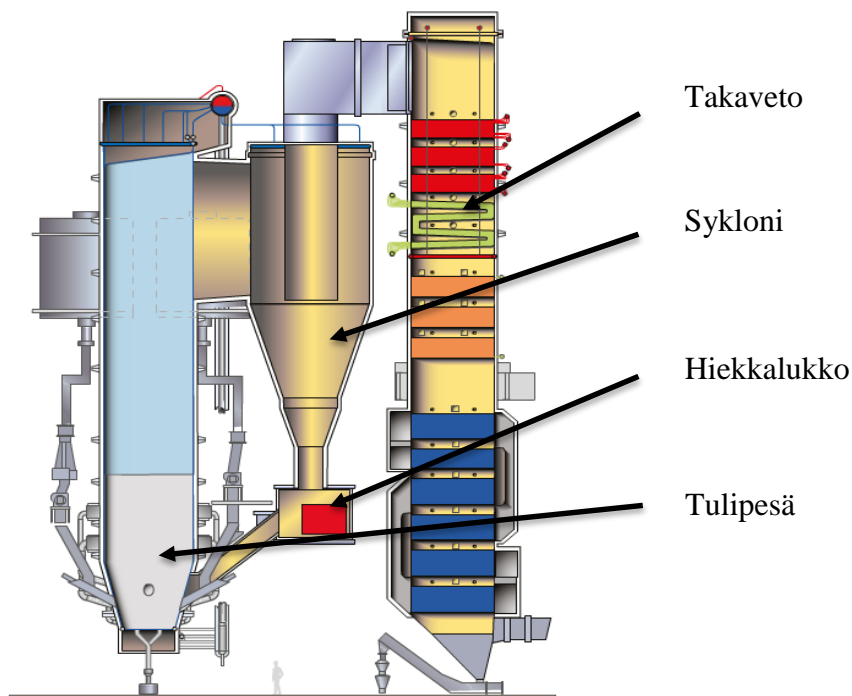
KUVIO 4. HYBEX -kattilan sivukuvanto ja leijupeti (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016, muokattu)

BFB -kattilan tulipesässä voidaan polttaa muun muassa biopolttoaineita kuten puuhaketta, turvetta, prosessijätettä ja muuta biopohjaista jätettä sekä fossiilisia polttoaineita. Tulipesän petimateriaali koostuu tulipesään syötetystä hiekasta, poltettavasta aineesta ja tuhkasta (kuvio 4). Palamisprosessia hallitaan primääri-, sekundääri- ja tertiääri-ilmojen avulla. Osa vapautuvasta lämmöstä otetaan talteen tulipesän seinäputkissa kiertävään veden- ja höyryseokseen ja osa hyödynnetään höyryyn sidotun energian lisäämiseen. Loput savukaasujen lämpöenergiasta käytetään palamisilman ja syöttöveden lämmittämiseen, jotka sijaitsevat kakkosvedossa. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016)

Tulistettu höyry viedään höyryputkia pitkin höyryturbiinille, jossa höyryyn sidottu energia muutetaan mekaaniseksi työksi. Höyryturbiinin ja generaattorin kautta saadaan lopulta tuotettua sähköä eri tarpeisiin. BFB -kattilalaitoskokonaisuuteen kuuluvat myös lauhduttimet, siilot, kuljettimet, savukaasun puhdistuslaitteet, automaatio- ja säätöjärjestelmät sekä muut apujärjestelmät. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016)

4.3 CYMIC -kattila

CYMIC -kattila on Valmetin tuotenimi CFB -tyyppiselle kattilalle, joka perustuu kiertävään leijupoltteknologiaan, ”circulating fluidized bed”. CFB -kattilalla tuotetaan prosessihöyryyn avulla lämpöä ja sähköä samaan tapaan kuin BFB -kattilalla, mutta toimintaperiaate poikkeaa BFB -kattilasta. CFB -kattila rakentuu kolmesta eri pääkomponentista, joita ovat tulipesä, sykloni ja hiekkalukko. Niin sanottua kuumakiertoa seuraa takaveto, jossa sijaitsevat muun muassa tulistimet ja veden sekä ilman esilämmittimet. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016) CFB -kattilarakenteen sivukuvanto on esitetty kuviossa 5.

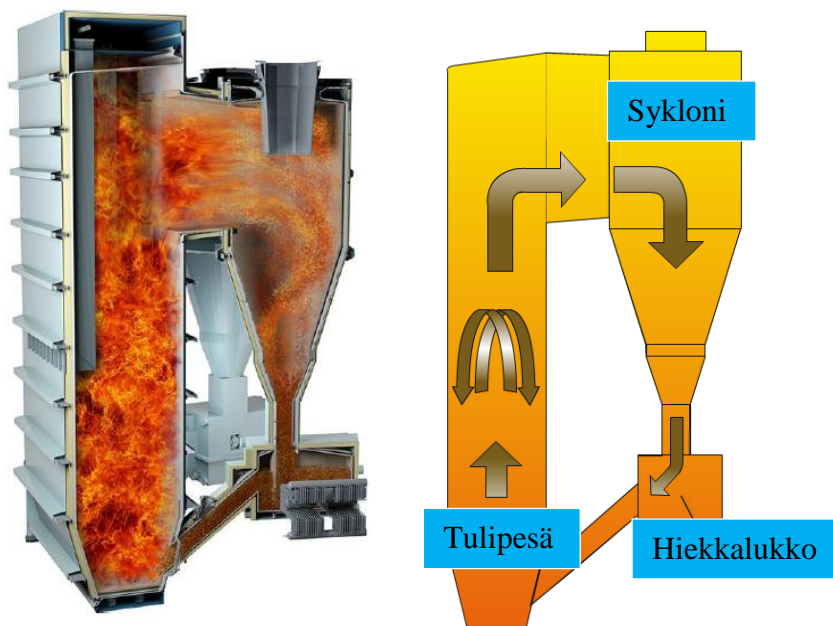


KUVIO 5. CFB -kattilarakenteen sivukuvanto (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016, muokattu)

4.4 CYMIC -kattilan kuumakierto

CFB -kattilan tulipesä, sykloni ja hiekkalukko muodostavat yhdessä tehokkaan palamisprosessikierron. Tulipesässä voidaan polttaa kosteita biopolttoaineita ja esimerkiksi hiiltä korkealla hyötysuhteella ja pienemmillä päästöillä. Palamattomat partikkelit kiertävät tulipesästä ensin sykloniin, sieltä hiekkalukkoon ja takaisin tulipesään. Kiinteiden partikkelien erotus savukaasuista syklonissa perustuu savukaasujen tangentiaaliseen syöttöön, joka muodostaa pyörteen syklonin sisälle. Palamattomat partikkelit ajautuvat näin ollen syklonin seinämää kohden ja putoavat lopulta alas hiekkalukkoon. Savukaasut puolestaan poistuvat syklonin keskellä sijaitsevaa kanavaa pitkin ylös takavetoon. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016)

Hiekkalukko erottaa tulipesän ja syklonin alaosan toisistaan ja estää savukaasuja virtaamasta vastakkaiseen suuntaan. Samalla se palauttaa palamattomat partikkelit ja hiekan takaisin tulipesään. Hiekkalukossa hiekan kiertoa pidetään yllä puhaltamalla ilmaa hiekkakerrokseen. Valmetin hiekkalukko-komponentteja on kahdenlaisia, joista toiset ovat perinteisiä tulistimettomia hiekkalukkoja ja toiset puolestaan tulistimellisiä hiekkalukkoja. Tulistimellisiä hiekkalukkoja käytetään yleensä vaativampien polttoaineiden kohdalla. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016) Valmetin CFB -kattilan kuumakiertoa kuvataan kuviossa 6.



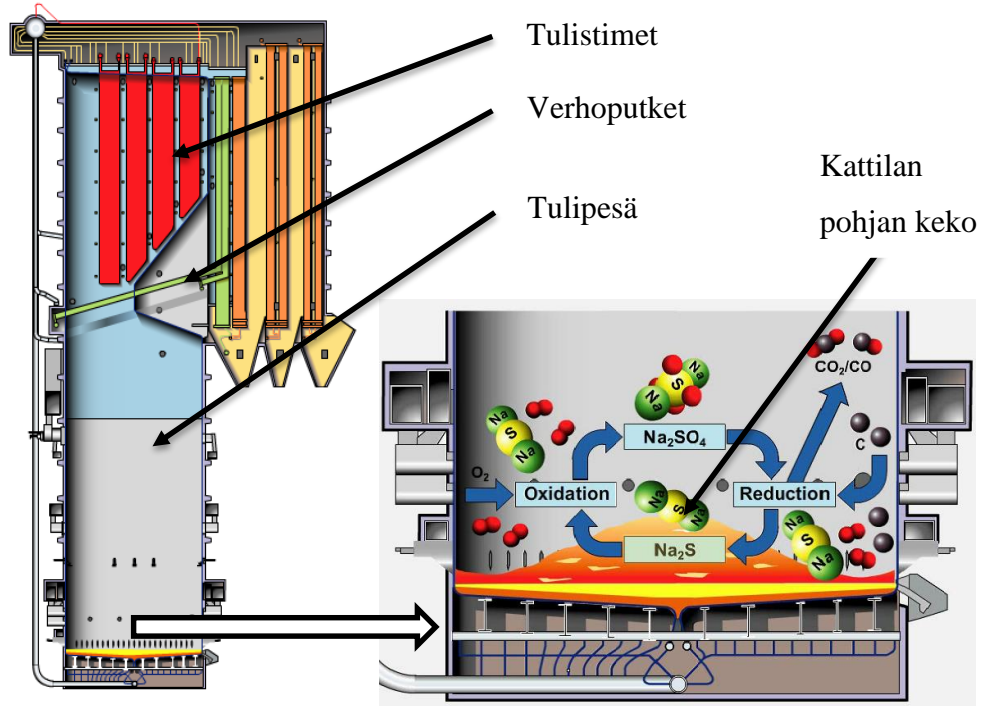
KUVIO 6. CFB-kattilan kuumakierto (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016, muokattu)

4.5 RECOX -kattila

RECOX -kattiloiksi kutsutaan Valmetin soodakattiloita, jotka ovat tärkeä osa sellun valmistusprosessia. Tuotenimi tulee sanasta ”recovery” eli talteenotto, millä tarkoitetaan kemikaalien ja palamislämmön talteenottoa. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016) Sellun valmistus on itsessään monivaiheinen prosessi. Siihen kuuluvat muun muassa puun käsittely, keittäminen, keittoneesteeseen liuenneen lingniinin eli mustalipeän muodostuminen, mustalipeän peseminen ja haihduttaminen sekä lopulta polttaminen soodakattilassa. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 69-74)

Soodakattilassa mustalipeän sisältämä orgaaninen aines palaa ja vapautuvalla energialla tuotetaan höyryä. Höyryturbiinilla ja generaattorilla saadaan tuotettua sähköä samaan tapaan kuin BFB- ja CFB -kattiloissa. Jäljelle jäänyttä lämpöä käytetään prosessien lämmitykseen. Epäorgaaninen keittokemikaaleja sisältävä aines puolestaan regeneroituu kattilan pohjalla olevassa keossa. Syntyvä sula-aines, joka koostuu natriumsulfidista ja natriumkarbonaatista, ohjataan jäähdytettyä sularänniä pitkin liuotinsäiliöön jatkoprosessointia varten. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 69-74; Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016)

RECOX -kattilan rakenne on monilta osin erilainen kuin voimakattiloiden rakenne. Yksi syy erilaisille ratkaisuille on suurempi korrodoituvuus, jonka vuoksi tietyissä kohteissa käytetään esimerkiksi compound -putkea. Compound -putkessa kattilaputken päälle on kiinnitetty metallurgisella sidoksella suojakerros austeniittista terästä. Soodakattiloita on myös nuohottava jatkuvasti. Muun muassa Valmet käyttää lisäksi verhoputkistoa tulipesän keskivaiheilla suojatakseen tulistimia tulipesän säteilyltä ja alentaakseen savukaasujen lämpötilaa. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 69-74; Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016) Tyypillinen Valmetin valmistaman RECOX -kattilan sivukuvanto ja palamisprosessi kuvataan kuviossa 7.



KUVIO 7. RECOX -kattilan sivukuvanto ja palamisprosessi (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016, muokattu)

5 PAINELAITTEET JA LAINSÄÄDÄNTÖ

5.1 Painelaitteiden määritelmä ja kattilarakenteen painerunko

Painelaitteet ja painelaitteiden mitoitus ovat oleellinen osa kattilarakenteiden suunnittelua. Painelaitteita ovat kaikki paineenalaiset komponentit, joita käytetään teollisuuspainelaitteistoissa, kiinteistö- ja pientalokattiloissa ja kuluttajapainelaitteissa. Teollisuuspainelaitteistoja ovat muun muassa höyry- ja vesikattilat, paineelliset putkistot ja painesäiliöt. Kuluttajapainelaitteita ovat pientalojen lämmitysjärjestelmien kattilat ja lämmivesivaraajat, paineilmakompressorit ja esimerkiksi sukelluspullot. (Tukes: Painelaitteet 2016)

Kattilarakenteiden painerungoissa painelaitteiksi luetaan kaikki vesi- ja höyrykierrossa olevat putkistot, säiliöt, varolaitteet ja muut paineenalaiset laitekokonaisuudet. Näihin kuuluvat muun muassa seinäelementtien putket, kammiot, yhdysputket, sisäisen- ja ulkoisenkierronputket ja lieriö. Painerungon suunnitteluun kuuluvat myös muun muassa tukirakenteiden ja kannatusrakenteiden mitoittaminen. (Alin 2015, Painelaitteasiaa Servicelle: PED ja EN12952)

5.2 Painelaitedirektiivi PED97/23EY

Painelaitteille on Euroopan markkina-alueella määritetty yhteiset vaatimukset sisältävä painelaitedirektiivi PED97/23EY. Uudistettu direktiivi PED2014/68/EU tulee voimaan kesällä 2016. Suomessa direktiivin vaatimukset on viety lainsäädäntöön painelaitelain, asetusten ja kauppa- ja teollisuusministeriön päätöksellä painelaitteista (938/1999). Tätä sovelletaan painelaitteisiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 bar:a. Painelaitedirektiivi mahdollistaa painelaitteiden saattamisen markkinoille vapaasti koko Euroopan alueella. KTM:n päätös painelaitteista sisältää vaatimukset painelaitteiden suunnittelulle, valmistukselle ja vaatimustenmukaisuuden arvioinnille. Markkinoiden valvonnasta Suomessa vastaa TUKES. (Alin 2015, Painelaitteasiaa Servicelle: PED ja EN12952); Tukes: Painelaitteopas 2016)

Painelaitteet jaetaan PED:ssä kasvavan riskin mukaan neljään eri luokkaan, joista luokka I on vähiten riskiä aiheuttava ja IV vaativin luokka. Riskiluokat jaetaan puolestaan moduuleihin, joita kuvataan eri kirjaintunnuksilla. Moduulien erittelyissä kerrotaan tarkemmin, mitä arviointimenettelyitä näissä käytetään. Kokonaisuutta selventää taulukko 1. Valmetin kattilarakenteiden painerungot kuuluvat riskiluokkaan IV. Arvioinnissa käytetään moduulia G, jossa ilmoitettu laitos tekee tuotteen suunnitelma- ja loppuarvioinnin. Suomessa toimivia ilmoitettuja laitoksia ovat Inspecta ja Dekra. Tarkemmat selitteet moduuleista löytää TUKES:n painelaitteopasta tai liitteestä 1. (Alin 2015, Painelaitteasiaa Servicelle: PED ja EN12952); Tukes: Painelaitteopas 2016)

TAULUKKO 1. Painelaitteiden luokat ja niitä vastaavat moduulit (Tukes: Painelaitteopas 2016)

VAATIMUSTENMUKAISUUDEN ARVIOINTIMENETTELYT MODUULI TAI MODUULIYHDISTELMÄ			
LUOKKA I	LUOKKA II	LUOKKA III	LUOKKA IV
A	A1	B1 + D	B + D
	D1	B1 + F	B + F
	E1	B + E	G
		B + C1	H1
		H	

Lisäksi painelaitedirektiivi asettaa vaatimuksia muun muassa laskentamenetelmien ja materiaalien osalta. Yksinkertaisinta on käyttää harmonisoituja EN -standardeja, jolloin olennaiset turvallisuusvaatimukset tulee täytettyä. Standardien käyttö on vapaaehtoista, mutta mikäli niitä ei käytetä, täytyy turvallisuusvaatimusten täytyminen osoittaa muulla tavoin. Painelaitte tulee valmistajan puolesta myös CE -merkitä. (Alin 2015, Painelaitteasiaa Servicelle: PED ja EN12952; Tukes: Painelaitteopas 2016)

5.3 Vesiputkikattilastandardi EN-12952

Vesiputkikattilastandardi EN-12952 täyttää PED:n asettamat vaatimukset ja on laajasti käytössä Euroopan markkina-alueella. Tähän kuuluu yhteensä 16 eri osaa, joista tärkeimpiä varsinkin painelaitteiden mitoituksen kannalta ovat osat 1, 2, 3, 5, 6 ja 7. Osassa 1 kerrotaan yleisesti vesiputkikattiloista, osassa 2 käsitellään materiaali vaatimuksia, osa 3 on tarkoitettu suunnitteluun ja laskentaan, osasta 5 selviävät valmistukseen liitty-

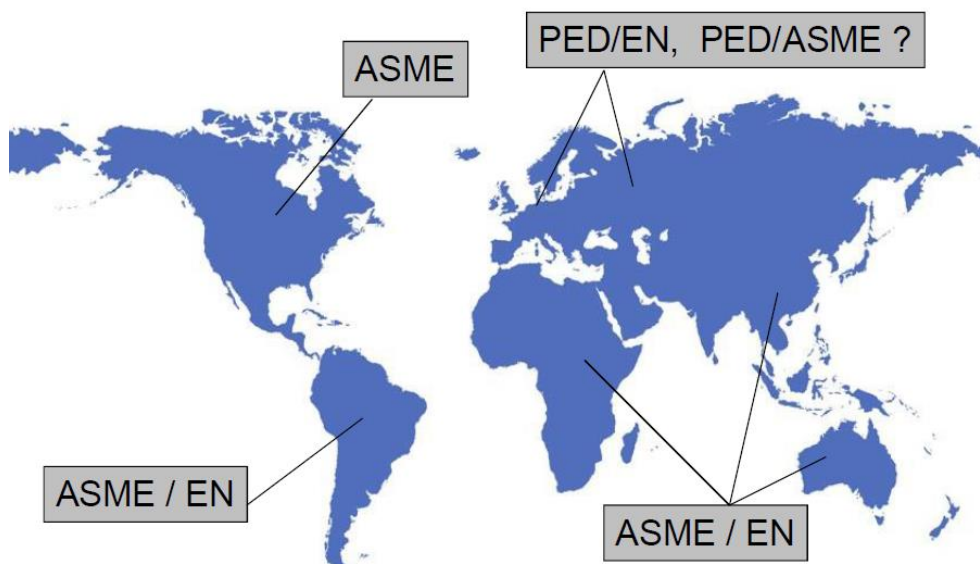
vät asiat, ja osassa 7 käsitellään varusteluihin liittyviä vaatimuksia. (Alin 2015, Painelaitteasiaa Servicelle: PED ja EN12952)

Pääpaino painelaitteiden suunnittelussa on standardin osalla 3, joka käsittää 13 eri kappaletta. Standardissa EN-12952-3 kerrotaan muun muassa yleisistä suunnitteluun liittyvistä asioista, laskentalämpötilasta ja nimellisestä suunnittelujännityksestä, sisäisen paineen kuormittamista sylinterimäisistä vaipoista, aukoista ja yhteistä, päätyjen ja putkien laskennasta sekä väsymisilmiöstä (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012). Kaikki asiat on standardissa käsitelty hyvin yksityiskohtaisesti, jotta tulkinnanvaraisuutta ei tulisi. Koska laskennalliset kohteet ovat aina tapauskohtaisia, täytyy omaa harkintaa kuitenkin myös osata käyttää.

Materiaaleja käsittelevä standardin osa 2 on myös tärkeä, kun tutkitaan eri painelaiteterästen ominaisuuksia ja tehdään valintoja näiden suhteen. Painelaitemateriaalien vaatimuksia PED:n mukaan ovat muun muassa sitkeys, hitsattavuus, muovattavuus ja lujuusarvot eri lämpötila-alueilla. Ainestodistuksilla materiaalin valmistaja todentaa ominaisuuksien täyttymisen. Tyypillisiä EN -painelaiteteräksiä kattilan valmistuksessa ovat esimerkiksi P265GH, 16Mo3, 13CrMo4-5, P355GH ja P460NH. (Alin 2015, Painelaitteasiaa Servicelle: PED ja EN12952)

5.4 ASME -painelaittekoodi

ASME -painelaittekoodi on amerikkalainen yleisimmin käytetty toimituskoodi kattilalaitosten valmistuksessa eri puolella maailmaa. ASME:a käytetään Pohjois-Amerikan lisäksi Etelä-Amerikassa ja monissa Aasian maissa (kuvio 8). ASME -koodilla on lain asema useimmissa Pohjois-Amerikan osavaltioissa ja sitä käytetään muualla kansainvälisenä suunnittelu- ja valmistusstandardina. Koodi sisältää omat vaatimuksensa paineastioiden suunnitteluohjeista, sallituista materiaaleista ja näiden ominaisuuksista sekä esimerkiksi tarkastuksiin liittyvistä asioista. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot)



KUVIO 8. EN -standardin ja ASME -koodin käyttö (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot)

ASME:n koodikokoelman tärkeimpiä osia ovat ASME Section I, ASME Section II Part A ja Part D sekä ASME B31.1, joka käsittelee kattilan ulkopuolisia putkistoja. ASME-koodi määrittelee minimivaatimustason kattilan valmistukselle ja kattilan valmistajilla sekä tilaajilla onkin usein käytäntönä suuremmat vaatimukset. Tämä tulee esille esimerkiksi kattilan osien tarkastusten osalta. Myös kohdemaan omat vaatimukset tulee huomioida toimitettaessa kattiloita muualle kuin Pohjois-Amerikkaan. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot)

Tärkein osa ASME:n koodikokoelmassa on ASME Section I, joka käsittää varsinaisen kattilan päävaatimukset muun muassa suunnittelun, valmistuksen ja tarkastusten osalta. Tähän kuuluvat kaikki sisäisen kierron putkistot, kun muilla kattilan putkistoilla noudatetaan B31.1:tä. Section I koostuu useammasta eri osasta, joista vesiputkikattiloiden osalta tarvitaan osia PG, PW, PWT ja PFH. Osassa PG käsitellään yleisiä vaatimuksia valmistusmenetelmille ja suunnittelulle, osassa PW on vaatimuksia hitsaukseen liittyvistä asioista, osa PWT käsittelee vaatimuksia vesiputkikattiloille ja PFH valinnaisia vaatimuksia syöttöveden lämmittimelle. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot; ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

ASME:n Section I osista eniten tarvetta on osalle PG. Kattilarakenteina pidetään kattiloita, joissa höyryn paine on yli 15 psig eli 100 kPa tai vaihtoehtoisesti korkean lämpötilan kuumavesikattiloita. ASME jakaa kattilan ja siihen liittyvät putkistot lisäksi kol-

meen eri kategoriaan, joita ovat Boiler Proper, Boiler External Piping ja Non-Boiler External Piping. Boiler Proper käsittää varsinaisen kattilan painerungon, Boiler External Piping kattilaan liittyvät putkistot ensimmäiseen tai toiseen sulkuventtiiliin asti ja Non-Boiler External Piping kattilan ulkopuoliset putkistot. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot; ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

5.5 ASME-materiaalit

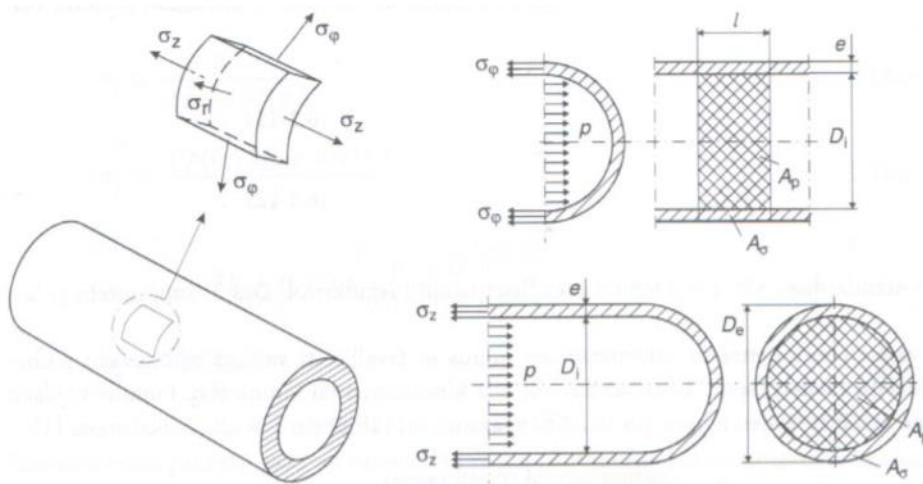
ASME:ssa Section I:n osassa PG listataan sallitut materiaalispesifikaatiot, jotka löytyvät puolestaan ASME Section II:n osasta Part A. Putkimateriaaleille on aina kaksi rinnakkaista materiaalispesifikaatiota, joita ovat tube -materiaalit ja pipe -materiaalit. Tube -materiaaleja käytetään lämpöpintaputkissa ja ne tilataan minimiseinämällä. Pipe -materiaaleja käytetään muissa putkissa kuten yhdysputkissa ja kammioissa, ja ne tilataan nimelliseinämällä. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot)

ASME:n materiaalispesifikaatioissa esitetään muun muassa vaatimukset materiaalien metallurgisille ominaisuuksille, mekaanisille ominaisuuksille, tilausvaatimuksille ja testauksille. Varsinaiset materiaalien sallitut jännitykset ja esimerkiksi korkeimmat sallitut lämpötilat esitetään Section II Part D:ssä. ASME:ssa sallitut jännitykset sisältävät jo varmuuskertoimet. Tyypillisiä tube -materiaaleja ovat muun muassa SA-210 A-1, SA-209 T1, SA-213 T12, ja pipe -materiaaleja SA-106 B, SA-335 P1 sekä SA-335 P12. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot)

6 PAINELAITTEIDEN MITOITUS

6.1 Peruslujuusopillinen lähestyminen

Sylinterimäiseen paineastiaan vaikuttaa lujuusopillisesti avaruusjännitystila, jota voidaan kuvata lieriökuoren kuorielementillä. Kuorielementissä voi samanaikaisesti esiintyä kolme normaalijännityskomponenttia ja kolme leikkausjännityskomponenttia. Käytännössä lieriökuoressa on siis sisäisen paineen kuormittamana kolme pääjännitystä, jotka ovat säteensuuntainen jännitys (σ_r), tangentiaalinen jännitys (σ_φ), ja pituussuuntainen jännitys (σ_z) (kuvio 9). (Björk ym. 2014, 430-432)



KUVIO 9. Lieriökuoren kolme pääjännitystä (Björk ym. 2014)

Tangentiaalinen jännitys (σ_φ) ja pituussuuntainen jännitys (σ_z) saadaan tasapainoyhtälöiden kautta käyttämällä pinta-alalaskentaa. Näin saadaan niin sanotut kattilakaavat, joihin paineastioiden laskenta yksinkertaisimmillaan perustuu. Kaavoja käytettäessä kuitenkin oletetaan, että paineastian seinämä on paljon pienempi kuin halkaisija eli puhutaan ohutseinämäisestä rakenteesta. Säteensuunnassa lieriökuoreen kohdistuu puristusjännitystä lieriön sisäpinnassa ja ulkopinnassa vallitsee puolestaan jännityksetön tila. Näin ollen säteensuuntainen jännitys (σ_r) saadaan jännitysten keskiarvona. (Björk ym. 2014, 430-432) Lieriökuoren pääjännitysten kaavat (1), (2) ja (3) (Björk ym. 2014, 430-432, muokattu) ovat:

$$(2\sigma_{\varphi}tl) - (pdl) = 0 \quad \Rightarrow \quad \sigma_{\varphi} = \frac{pr}{t} \quad (1)$$

$$(\pi(d+t)t\sigma_z) - \left(p \frac{\pi^2}{4}\right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \sigma_z = \frac{pr}{2t} \quad (2)$$

$$\sigma_r = -\frac{1}{2}p \quad (3)$$

joissa (p) on kaasun tai nesteen paineesta syntyvää puristusjännitys, (t) on paineastian seinämänpaksuus, (l) on paineenalaisen osuuden pituus, (r) on paineastian sisäsäde ja (d) on sylinterin sisähalkaisija. Kaavoissa esiintyviä symboleita on muokattu kuviossa 9 esitetystä symboleista.

Kun kuoren jännitystilaa tutkitaan vielä hieman tarkemmin, käytetään yleensä maksimi-leikkausjännityshypoteesia eli Trescan myötöehtoa. Tresca:n myötöehdon mukaan ”materiaali myötää sellaisessa pisteessä, jossa pisteen jännitystilan suurin leikkausjännitys saavuttaa materiaalin leikkausmyötörajan” (Salmi & Pajunen 2010, 332). Hypoteesin mukaan yleisen jännitystilan maksimileikkausjännitys saadaan kaavasta (4) (Salmi & Pajunen 2010, 332):

$$\tau_{max} = \frac{1}{2}(\sigma_I - \sigma_{III}) \quad (4)$$

jossa (τ_{max}) on maksimileikkausjännitys, (σ_I) on suurin pääjännityksistä ja (σ_{III}) on pienin pääjännityksistä. Kattilakaavojen perusteella maksimijännitys esiintyy tangentialissa suunnassa ja minimijännitys säteen suunnassa. Näin ollen maksimileikkausjännityshypoteesin mukaan vertailujännitys on kaavan (5) (Salmi & Pajunen 2010, 332) mukainen:

$$\sigma_{vert} = \sigma_I - \sigma_{III} = \sigma_{\varphi} - \sigma_r = \frac{pr}{t} - \left(-\frac{1}{2}p\right) \quad (5)$$

Saatu vertailujännitys on hiukan suurempi kuin kattilakaavan antama suurin jännitys (σ_{φ}), mutta ero on kuitenkin hyvin pieni. Edellä olevista kaavoista voidaan siis ratkaista tarvittava paineastian seinämänpaksuus, mutta jos halutaan tutkia niin sanottua paksu-

seinämäistä rakennetta, tarvitaan konstitutiivisia yhtälöitä. Tilannetta voidaan kuvata rotaatiosymmetrisenä levyn tasojännitystilana (Salmi & Virtanen 2008, 140-142).

6.2 Standardien merkitys

Standardi on ”tunnustetun elimen vahvistama, konsensusperiaatteella laadittu, julkisesti saatavilla oleva suositusluontoinen asiakirja” (Valtanen 2012, 1). Standardeilla helpotetaan viranomaisten, yritysten ja kuluttajien arkea tekemällä tuotteista yhteensopivia ja turvallisia. Näin helpotetaan myös kansainvälistä kaupankäyntiä. Standardisointi voidaan jakaa maailmanlaajuiseen, eurooppalaiseen ja kansalliseen tasoon, joissa komiteat ja työryhmät toimivat standardien laatimiseksi. (SFS: Standardien laadinta 2016)

Standardeja on laadittu moneen eri tarkoitukseen kuten laadun parantamiseen, suunnitteluun, turvallisuusmääräysten täyttymiseen ja eri aloja koskeviin spesifeihin standardeihin. Standardien käyttö on vapaaehtoista, mutta mikäli niitä käytetään, täytyvät vähintäänkin tuotetta koskevat lakivaatimukset (Alin 2015, Painelaitteasiaa Servicelle: PED ja EN12952). Muun muassa tästä syystä painelaitteiden mitoitus perustuu hyvin pitkälle standardisointeihin menettelytapoihin. Lisäksi yrityksissä tehdään paljon sisäistä standardisointia eli vakioidaan hyväksi koettuja menettelytapoja niin suunnittelun kuin esimerkiksi valmistuksen osalta.

6.2.1 Vesiputkikattilastandardi EN-12952 mitoituksessa

EN -vesiputkikattilastandardissa annetaan omat kaavat muun muassa yksittäisten putkien, yksittäisten- ja vierekkäisten yhteiden sekä päätylevyjen laskentaan. Kaavojen avulla voidaan optimoida putkien ulkohalkaisijoita ja seinämänpaksuuksia. Alkuparametrien määrittämiselle, joita ovat laskentapaine, laskentalämpötila ja suunnittelujännitys, annetaan myös tarkat ohjeet. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

EN -standardi ohjeistaa myös muista rakenteisiin vaikuttavista kuormituksista. Näitä ovat muun muassa lämpölaajenemisesta aiheutuvat voimat ja momentit, omasta ja sisällön painosta aiheutuva taivutus, paikalliset tukivoimat ja kiinnikkeistä aiheutuvat voi-

mat sekä nopeat paineen ja lämpötilan vaihtelut. . (Alin 2015, Painelaiteasiaa Servicelle: PED ja EN12952). Tässä työssä keskitytään kuitenkin vain putkien ja kammioiden sisäisen paineen kuormituksista aiheutuviin jännityksiin ja näiden mitoittamiseen.

6.2.2 ASME-painelaitekoodi mitoituksessa

ASME -painelaitekoodi antaa samaan tapaan omat suunnitteluohjeet kattilan painerungon mitoittamiseen. ASME ei kuitenkaan määrittele alkuparametreja eikä yksittäisiin putkiin liittyvää mitoitusta yhtä laajasti kuin EN. Laskennassa käytetään monesti EN:stä adoptoituja tapoja täydentää ASME:n mitoitusta. Kammioiden mitoituksessa käytetään yleensä reikäkenttätarkastelua ja ainoastaan suuremmat yhteet lasketaan niin sanotulla pinta-alakompensointimenettelyllä. Kompensointilaskentaa voidaan käyttää muissakin tapauksissa, joista esimerkkinä ovat kammioiden päätylevyihin liittyvät tarkastusputket. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot)

7 EN-STANDARDIN MUKAINEN MITOITUS

7.1 Laskentapaine-, lämpötila ja suunnittelujännitys

Vesiputkikattilastandardin EN-12952-3 mukaisia alkuparametreja ovat laskentapaine (p_c), laskentalämpötila (t_c) ja suunnittelujännitys (f). Laskentapaine määräytyy suunnittelupaineesta (p_d) ja sallitusta paineesta (PS). Yleensä laskentapaineena käytetään suunnittelupainetta, johon lisätään komponentin sijainnista riippuva hydrostaattinen paine (p_{st}) tai sisällön virtauksen aiheuttaman painehäviön vaikutus. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

Laskentalämpötila (t_c) määritetään vertailulämpötilasta (t_{or}) ja lämpötilalisästä. Vertailulämpötila on laskettavan kohteen sisällön keskimääräinen käyttölämpötila, mikä riippuu veden fysikaalisesta tilasta. Lämpötilalisä riippuu puolestaan kohteen ympärillä vallitsevista olosuhteista. Esimerkiksi, jos putkirakenteessa virtaa vesi ja rakenne on pääasiassa säteilyllä lämmitetty, käytetään vertailulämpötilana kylläisen höyryn lämpötilaa ja lämpötilalisänä 50 °C:ta. Taulukossa 2 on esitetty, miten lämpötila missäkin olosuhteissa määräytyy. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

TAULUKKO 2. Lämpötilalisän määräytyminen (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

Fysikaalinen tila	Vertailulämpötila	Lämpötilalisä			
		Lämmittämättömät osat ^a	Lämmitetyt osat ^a		
			Pääasiassa säteilyllä lämmitetyt osat ^b	Pääasiassa konvektiolla lämmitetyt osat	Säteilyä vastaan suojatut osat
Vesi tai veden ja höyryn seos	Sallittua (käyttöyli-) painetta p_{s1} tai sallittua (kokonaisyli-) painetta p_{s2} vastaava kylläinen lämpötila	0 °C	50 °C kammioille ^c (30 + 3 e_s) °C kuitenkin vähintään 50 °C	(15 + 2 e_s) °C ei kuitenkaan enempää kuin 50 °C	20 °C
Tulistettu höyry	Tulistettu höyry, katso myös kohta 6.1.3	15 °C, katso myös kohta 6.1.5	50 °C	35 °C	20 °C

Suunnittelujännityksen (f) peruskaava on kaavan (6) (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012) mukainen. (K) kuvaa materiaalin lujuusarvoa ja (S) varmuuskerrointa, jolla lujuusarvo jaetaan. Koepainetilanteelle kaava on samantyyppinen. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

$$f = \frac{K}{S} \quad (6)$$

Suunnittelujännityksen määräytymiseen vaikuttavat kuitenkin monta eri asia. Valssatuille ja taotuille teräksille, austeniittisille teräksille, valuteräksille ja pallografiittiraudoille on jokaiselle omat yhtälönsä. Suunnittelujännitys voi myös perustua joko myötölujuuden eri arvoihin tai murtolujuuteen, ja korkeammissa lämpötiloissa virumismurtolujuuteen. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012) Monissa tapauksissa keskitytään valssattuihin ja taottuihin teräsrakenteisiin, jolloin suunnittelujännitys saadaan kaavan (7) (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012) mukaisesti:

$$f = \min\left(\frac{R_{m20}}{2,4}; \frac{R_{eHtc}}{1,5} \text{ tai } \frac{R_{p0,2tc}}{1,5}; \frac{R_{mTtc}}{1,25}\right) \quad (7)$$

jossa (R_{m20}) on murtolujuus huoneen lämpötilassa (20°C), (R_{eHtc}) on ylempi myötöraja laskentalämpötilassa (t_c), ($R_{p0,2tc}$) on 0,2% venymisraja laskentalämpötilassa (t_c) ja (R_{mTtc}) on virumismurtolujuus määritellylle eliniälle (T) laskentalämpötilassa (t_c). Virumismurtolujuuden ollessa määrittävänä tekijänä, eliniän (T) vähimmäisarvona käytetään kattilasuunnittelussa arvoa 100 000 tuntia. Mikäli elinikää ei ole määritetty, käytetään puolestaan arvoa 200 000 tuntia. Virumismurtolujuudet, kuten muutkin lujuusarvot, ovat materiaalikohtaisia. Jokaiselle materiaalille on erillisissä taulukoissa määritetty oma virumismurtolujuutensa tietyllä käyttötuntimäärällä. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

7.2 Suorat ja taivutetut putket

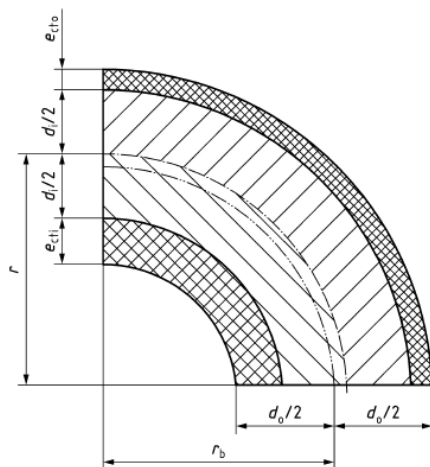
Suorien ja taivutettujen putkien mitoituksessa lasketaan aluksi suoran putken vaadittu seinämänpaksuus (e_{ct}) ilman erillisiä lisiä. Tämän jälkeen lasketaan vaadittu seinämänpaksuus (e_t) lisät mukaan lukien. Kun putken ulkohalkaisija tunnetaan, voidaan käyttää kaavoja (8) ja (9) (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012):

$$e_{ct} = \frac{p_c d_o}{2f + p_c} \quad (8)$$

$$e_t = e_{ct} + c_1 + c_2 \quad (9)$$

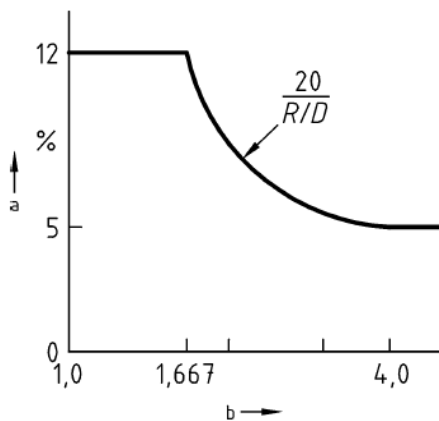
jossa (p_c) on laskentapaine, (d_o) on putken ulkohalkaisija, (f) on suunnittelujännitys, (c_1) ottaa huomioon valmistuksen sallitun alitoleranssin ja (c_2) on korroosiovara. Kun putken nimellinen ulkohalkaisija ja seinämänpaksuus ilman alitoleranssia tiedetään, saadaan putkien vähimmäispaksuudet. Nämä on taulukoitu vesiputkikattilastandardiin. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012) Käytännössä höyrykattiloissa laskentapaineet ovat kuitenkin niin korkeita, että seinämänpaksuutta tulee jo paineesta johtuen huomattavasti enemmän. (Alin 2015, Painelaiteasiaa Servicelle: PED ja EN12952)

Usein putkia joudutaan myös taivuttamaan, jolloin putken oheneminen ulkosyrjällä ja toisaalta tyssäntyminen sisäsyryllä tulee huomioida. Vesiputkikattilastandardi sisältää tähän omat sääntönsä suunnittelun ja valmistuksen näkökulmista. Suunnittelun näkökulmasta käytetään samaista putkien mitoittamisstandardin osaa 3 ja valmistuksen osalta osaa 5. Osassa 3 ja 5 määritetään omat vähimmäispaksuudet putkikäyrän ulko- ja sisätaipeelle omilla kaavoillaan. Valmistusosan kaavoja käytetään putkille, joiden ulkohalkaisija on enintään 142 mm, jonka jälkeen käytetään suoraan osan 3 kaavoja. Standardi antaa myös vaihtoehtoisia mitoitus tapoja putkien taivutuksille. Kuvio 10 havainnollistaa taivutustilannetta. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012; SFS-EN 12952-5: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2011)



KUVIO 10. Putken taivutus (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

Yksittäiselle putkelle asetetaan vielä yksi geometriseen muotoon liittyvä toleranssi, joka on epäpyöreys. Tällä kuvataan putkitaijutuksessa syntyvää ympyrämuodon poikkeamaa, jota mitataan % -yksiköissä. Epäpyöreys ei saa ylittää kuvion 11 mukaisia rajoja, mikäli putki on taivutettu yhtenä keskeytymättömänä vaiheena. Myös useammalle taivutusvaiheelle annetaan omat rajansa. Kuviossa 11 y-akseli kuvaa epäpyöreyttä ja x-akseli suhdelukua r_b/d_o . (r_b) on taivutussäde mitattuna putken keskilinjalta ja (d_o) on putken nimellinen ulkohalkaisija. (SFS-EN 12952-5: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2011)



KUVIO 11. Epäpyöreuden raja-arvot (SFS-EN 12952-5: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2011)

7.3 Yhteet lieriössä ja kammiossa

Lieriön tai kammion vaipan vaaditun seinämänpaksuuden laskentaa varten täytyy tuntea lujuuskerroin (v). Vaaditun seinämänpaksuuden kaavassa käytetään pienintä lujuuskerrointa, joka määritetään yksittäiselle yhteelle (v_b), vierekkäisille yhteille (v_m) tai vastaavasti aukoilta eri suunnissa. Kun sylinterin ulkohalkaisija (d_{os}) tunnetaan, saadaan sylinterimäisen vaipan seinämänpaksuus ilman lisiä laskettua kaavalla (10) (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012):

$$e_{cs} = \frac{p_c d_{os}}{(2f_s - p_c)v + 2p_c} \quad (10)$$

jossa (v) on lujuuskerroin kammion tai lieriön vaipassa. Vesiputkikattilastandardin mukaan vaipan paksuuden lisäksi on laskettava myös vaipan yhdistetyt jännitykset. Keski-

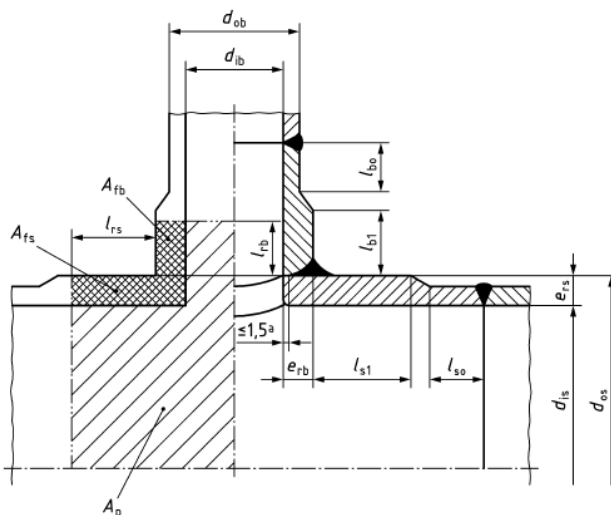
määräinen reikärivin jännitys ei saa ylittää suunnittelujännitystä, johon kuuluvat myös sisällön paino ja ulkoiset voimat. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012) Käytännössä kammion vaippaan kohdistuvat muut voimat ovat suhteessa kuitenkin niin pieniä, ettei tällä ole juurikaan vaikutusta mitoitukseen.

7.4 Yksittäiset ja vierekkäiset yhteen

Vesiputkikattilastandardi esittää useita eri ehtoja ja rajoituksia yhteen suunnittelulle. Tärkeimpiä mitoituksessa huomioitavia asioita ovat vahvistavaksi luettavat pituudet (l_{rs}) ja (l_{rb}). Näitä käytetään runkoputken korvaavan alan laskennassa ja lujuuskertoimen määrittämisessä. Pituusmittoja ja muita merkintöjä havainnollistaa kuvio 12. Vahvistavat pituudet lasketaan kaavoista (11) ja (12) (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012):

$$l_{rs} = \sqrt{(d_{is} + e_{rs})e_{rs}} \quad (11)$$

$$l_{rb} = \sqrt{(d_{ib} + e_{rb})e_{rb}} \quad (12)$$



KUVIO 12. Yhteen vahvistavaksi luettavat pituudet (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

Edellä esitettyjen vahvistavien pituuksien ja pinta-alojen mukaan voidaan määrittää runkoputken liitettävän suurimman vahvistamattoman putken ulkohalkaisija. Mikäli runkoputken halkaisija (d_{is}) ja seinämänpaksuus (e_{rs}) tiedetään, on liitettävän putken

suurin ulkohalkaisija (d_{ob}) kaavan (13) mukainen (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012):

$$d_{ob} \leq 2l_{rs} \left(\frac{2e_{rs}}{d_{is}} \left(\frac{f_s}{p_c} - \frac{1}{2} \right) - 1 \right) \quad (13)$$

Lujuusehdon ja lujuuskertoimen määrittämiseksi yksittäiselle aukolle kohtisuoralla yhteellä käytetään kaavoja (14) ja (15) (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012). Lujuustarkastelussa yhteen vahvistava vaikutus otetaan huomioon. Kaavoissa oletetaan, että yhdeputken suunnittelujännitys on vähintään samansuuruinen kuin runkokappaleen suunnittelujännitys. Vinoille yhteille on olemassa omat kaavansa. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012) Kaavojen (14) ja (15) mukaan:

$$f_a = p_c \left(\frac{A_p}{A_{fs} + A_{fb}} + \frac{1}{2} \right) \leq f_s \quad (14)$$

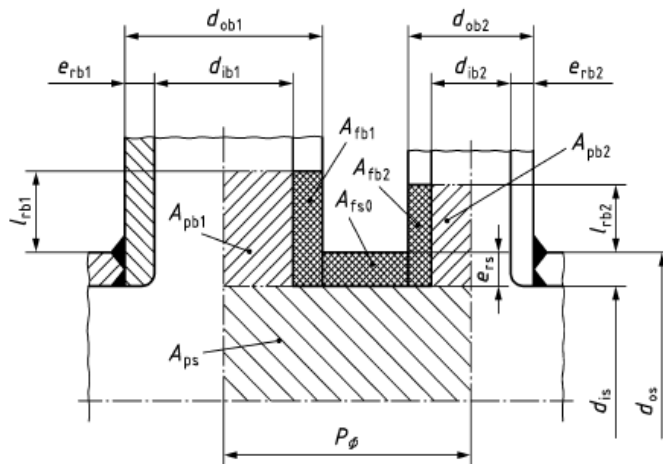
$$v_b = \frac{d_{is}(A_{fs} + A_{fb})}{2e_{rs}A_p} \leq 1 \quad (15)$$

joissa esiintyvät pinta-ala-alueet selviävät parhaiten kuviosta 13. Kun yhdeputkien välinen kannas runkoputkessa on alle $2 \cdot l_{rs}$, tarkastellaan niitä lisäksi vierekkäisinä yhteinä. Jos yhdeputkien suunnittelujännitys on yhtä suuri tai pienempi kuin runkoputken, on kaava (16) (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012) voimassa:

$$f_{a\varphi} = \frac{p_c}{2} \frac{2A_{ps} \frac{1 + \cos^2\varphi}{2} + 2A_{pb1} + 2A_{pb2} + A_{fs} + A_{fb1} + A_{fb2}}{A_{fs} + \frac{f_{b1}}{f_s} A_{fb1} + \frac{f_{b2}}{f_s} A_{fb2}} \leq f_s \quad (16)$$

jossa $(1 + \cos^2\varphi)/2$ on kattilakaavoista johdettu korjauskerroin. Lujuuskerroin on tässä tapauksessa kaavan (17) (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012) mukainen. Kaavoissa olevat pinta-alat esitetään kuviossa 13. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

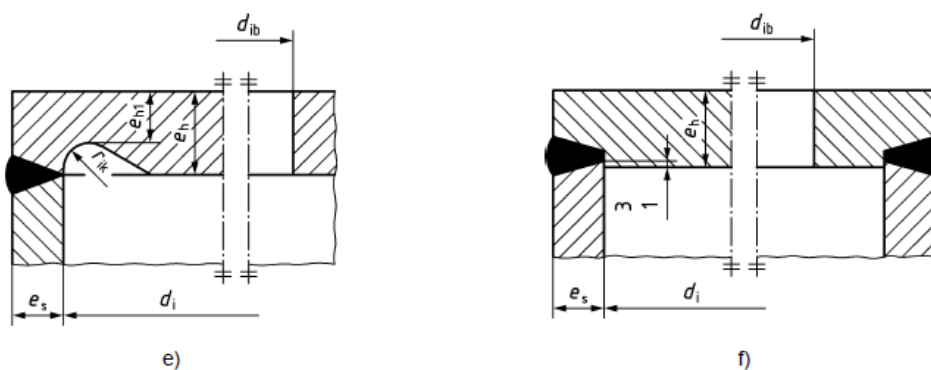
$$v_m = \frac{d_{is}}{e_{rs} 2A_{ps} \frac{1 + \cos^2 \varphi}{2} + 2A_{pb1} + 2A_{pb2} + A_{fb1} + A_{fb2} - \frac{f_{b1}}{f_s} A_{fb1} - \frac{f_{b2}}{f_s} A_{fb2}}{A_{fs0} + \frac{f_{b1}}{f_s} A_{fb1} + \frac{f_{b2}}{f_s} A_{fb2}} \leq 1 \quad (17)$$



KUVIO 13. Vierekkäiset yhteen (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

7.5 Päädty

Lieriöihin, kammioihin ja putkiin liitettäviä päädtyjä on useita erilaisia. Näistä eniten kattilan valmistuksessa käytettäviä päädtyjä ovat kuviossa 14 esitetyt suorat levypäädty. Myös kuperia päädtyjä, kuten esimerkiksi puolipallomaisia päädtyjä, voidaan käyttää. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)



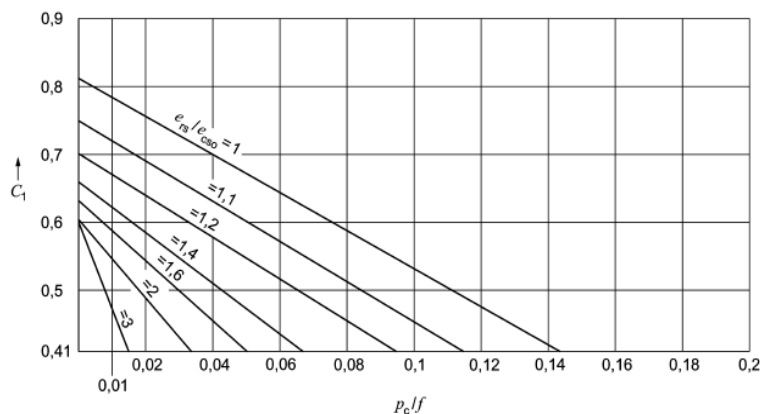
KUVIO 14. Suoria tukemattomia levypäädtyjä (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

Tasaisessa levypäädyyssä riittää, että lasketaan seinämänpaksuus (e_{ch}), johon lisätään valmistustoleranssi ja korroosiovara. Jos käytetään kevennysurallista päätyä, tulee lisäksi laskea tarvittava seinämänpaksuus (e_{chl}) uran pohjalla. Laskentaan liittyy useampia eri kertoimia, jotka saadaan määritettyä graafisten kuvaajien perusteella. Kertoimiin vaikuttavat muun muassa liittämistapa sylinterimäiseen vaippaan ja levypäädyyssä olevat aukot ja yhteen. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012) Päätyjen vaadittavat seinämänpaksuudet lasketaan kaavoilla (18) ja (19) (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012):

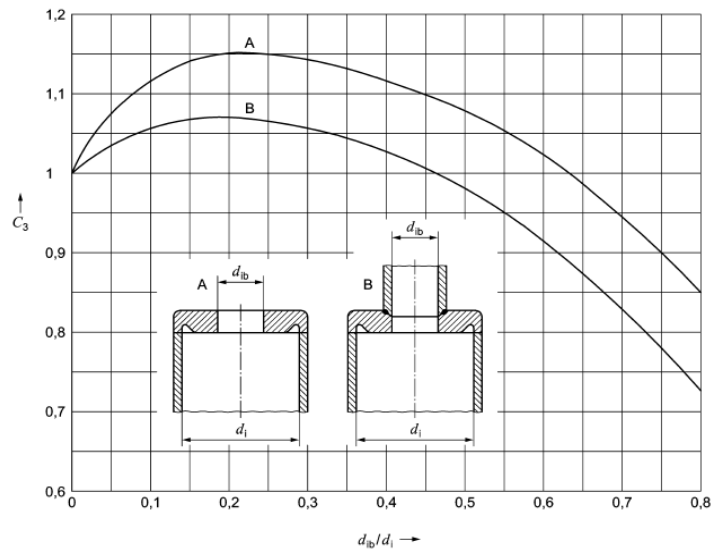
$$e_{ch} = C_1 C_2 C_3 d_i \sqrt{\frac{p_c}{f}} \quad (18)$$

$$e_{chl} \geq 1,3 p_c \frac{\left(\frac{d_i}{2} - r_{ik}\right)}{f} \quad (19)$$

jossa myös ehdon ($e_{chl} \geq e_{rs}$) on täyttyvä. Muoto- ja suunnittelukertoimet (C_1) ja (C_3) saadaan kuvioista 15 ja 16. (C_2):n arvo on pyöreille päädyyille 1. (R_{ik}):lla kuvataan kevennysuran sisäsädettä. (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)



KUVIO 15. Muotokertoimen C_1 määrittäminen (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)



KUVIO 16. Suunnittelukertoimen C_3 määrittäminen (SFS-EN 12952-3: Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot 2012)

8 ASME-KOODIN MUKAINEN MITOITUS

8.1 Laskentapaine-, lämpötila ja suunnittelujännitys

ASME -painelaitekoodissa ei käytetä niin monia eri määrytyksiä esimerkiksi laskentapaineelle kuin EN -vesiputkikattilastandardissa. Symbolilla (P) kuvataan maksimia sallittua työpainetta, johon lisätään tarvittaessa hydrostaattinen painelisa. Staattista painelisaä ei tube -materiaaleihin kuuluvilla lämpöpintaputkilla tarvitse huomioida, jolloin laskentapaine on sama kuin maksimi sallittu työpaine. Pipe -materiaaleilla, kuten kamioilla ja yhdysputkilla, laskentapaineeseen kuitenkin huomioidaan myös staattisesta paineesta johtuva lisa. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot; ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

Suunnittelulämpötilasta käytetään nimitystä metallin lämpötila, joka on maksimi keskilämpötila putken seinämässä. Toisin sanoen se on ulko- ja sisäpinnan keskiarvo tai fluidin lämpötila, joka ei kuitenkaan ole alle kyläläisen höyryn lämpötilan. Mahdolliselle lämpötilalisläelle ei anneta erikseen ohjeistusta, vaan suunnittelijan on tämä määritettävä. Laskennassa käytetään tilanteesta riippuen esimerkiksi kyläläisen höyryn lämpötilaa, johon lisätään EN:n mukainen lämpötilalisa. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot; ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

Suunnittelujännitykset eli sallitut jännitykset on esitetty Section II Part D:ssä, ja näitä merkitään symbolilla (S). Jännitykset on määritetty vastaavalla tavalla kuin EN -vesiputkikattilastandardissa, mutta ASME:ssa varmuuskertoimet on huomioitu jo valmiiksi. Varmuuskertoimissa on lisäksi jonkin verran eroja EN:ään verrattuna, joka vaikuttaa valittuun tapaan määrittää sallittu jännitys. Esimerkiksi varmuus murtolujuuteen on ASME:ssa 3,5 ja EN:ssä 2,4, jolloin sallitut jännitykset jäävät ASME:ssa usein alhaisemmiksi. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot; ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

Putken taivutuksien osalta ASME:ssa ei erikseen määritetä putken ulkokehän sallittua ohenemaa tai sisäkehän tyssäntymistä. Vaatimuksena on, että taivutetulla putkella tulee olla sama vaadittu minimizeinä, joka määritetään suoralle putkelle. Putken seinämänpaksuutta valittaessa tuleekin seinämän mahdollinen oheneminen taivutuksissa huomioida. Poikkeamalle ympyrämuodosta eli epäpyöreydelle ei myöskään anneta erikseen vaatimuksia, jolloin yleensä käytetään EN -standardin mukaisia tapoja määrittää putken sallittu epäpyöreys. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot)

Putkien laskennassa tarkastellaan myös suurimman sallitun yksittäisen aukon halkaisija. Mikäli putkeen tehdään suurempi aukko, täytyy aukon vaikutus tarkastella pinta-alakompensointilaskennalla. Suurimman sallitun vahvistamattoman aukon halkaisija lasketaan Section I:n osassa PG-32 esitetyillä kaavoilla, joista saatava suurempi arvo on määräävä. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013) Kaavojen (22) ja (23) (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013) mukaan:

$$d_{max} = 8.08(Dt(1 - K))^{\frac{1}{3}} \quad (22)$$

$$\frac{1}{4}ID, max 60.0mm \quad (23)$$

joissa (d_{max}) on aukon maksimihalkaisija, (D) on kammion vaipan ulkohalkaisija, (t) on putken seinämänpaksuuden nimellismitta, (K) on PD/1,82St ja (ID) on putken sisähalkaisija. (K):n arvoksi valitaan enintään 0,990. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

8.3 Kammioiden reikäkentät

Kammioiden reikäkenttätarkastelu on ASME:ssa tavanomaisempi tapa, kun EN:ssä puolestaan tutkitaan yleensä yksittäisiä ja vierekkäisiä yhteitä vahvistavina. ASME:ssa on reikäkentän tarkastelulle omat menetelmänsä ja aukkoja tarkastellaan niiden esiintymissuunnissa. Pitkittäisessä suunnassa ja kehän suunnassa kaavat ovat melko yksinkertaisia ja kammion vaipan lujuuskerroin on näin ollen helppo määrittää. Diagonaalisessa eli aukkojen vinottaisessa suunnassa (kuvio 17) lujuuskertoimen määrittämiseen tarvit-

tava kaava on jo hieman monimutkaisempi. Tästä huolimatta lähes aina pitkittäinen suunta antaa pienimmän lujuuskertoimen, jota käytetään kammion seinämän paksuuden määrittämisessä. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

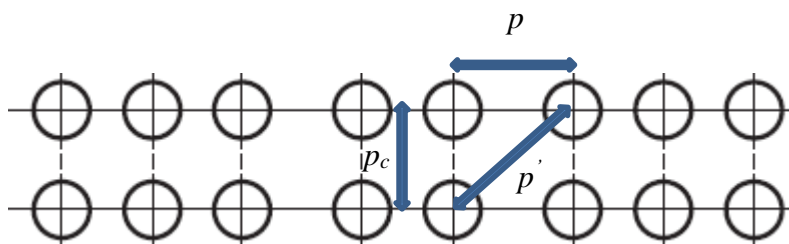
Lujuuskertoimet pitkittäisessä suunnassa (E_1), poikittaisessa suunnassa (E_2) ja diagonaalisisessa suunnassa (E_3) saadaan kaavoilla (24), (25) ja (26) (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013). Näiden mukaan:

$$E_1 = \frac{p - d}{p} \quad (24)$$

$$E_2 = \frac{2(p_c - d)}{p_c} \quad (25)$$

$$E_3 = \frac{\sec^2\theta + 1 - \left(\frac{\sec\theta}{\frac{p'}{d}}\right)\sqrt{3 + \sec^2\theta}}{0.015 + 0.005\sec^2\theta} \quad (26)$$

joissa (d) on aukkojen keskihalkaisija, (p) on aukkojen pitkittäissuuntainen etäisyys, (p') on aukkojen diagonaalinen etäisyys, (p_c) on aukkojen kehän suuntainen etäisyys ja (θ) on kehällä olevien aukkojen välinen kulma. Etäisyydet tulee määrittää aina kammion keskisäteeltä. Kuviossa 17 on kuvattu lieriön tai kammion mahdollista reikäkenttää. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)



KUVIO 17. Vaipan reikäkentän levityskuva ja suunnat p , p' , p_c (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013, muokattu)

8.4 Pinta-alakompensointilaskenta

Jos reikäkenttätarkastelua ei voida soveltaa, käytetään pinta-alakompensointilaskentaa. Kompensointilaskennassa lasketaan aluksi aikaisemmin esitettyjen kaavojen mukaan kammion ja yhdeputken vaaditut seinämänpaksuudet. Tämän jälkeen määritetään kammion ja yhdeputkesta aukon kompensointiin huomioitavat vahvistavan alueen pituudet. Nämä lasketaan kaavoista (27) ja (28) (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013). Kaava (27) huomioi kammion vahvistavan alueen pituuden ja näistä arvoista valitaan suurempi arvo. Kaava (28) huomioi yhdeputken vahvistavan alueen pituuden ja saaduista arvoista valitaan puolestaan pienempi arvo. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013) Maksimit pituudet ovat:

$$d \text{ tai } \frac{d}{2} + t + t_n \quad (27)$$

$$2,5t \text{ tai } 2,5t_n + t_e \quad (28)$$

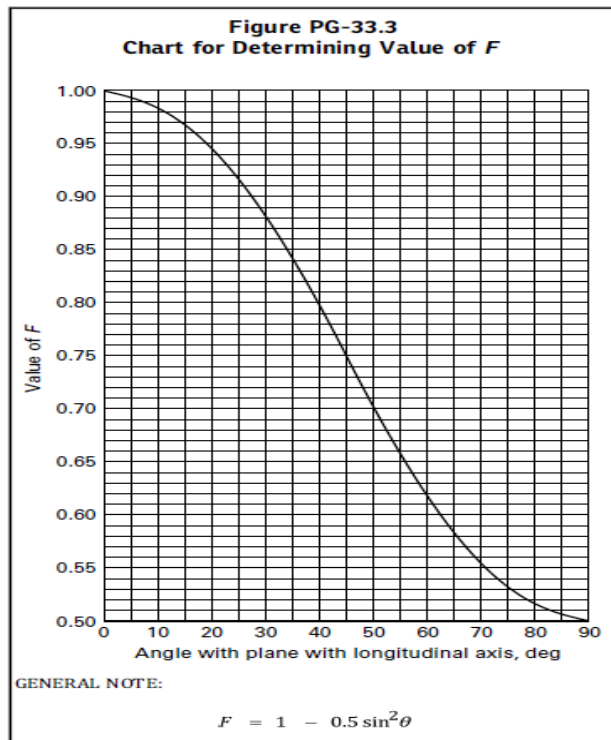
joissa (d) on reiän halkaisija, (t) on vaipan seinämänpaksuus, (t_n) on yhteen seinämänpaksuus ja (t_e) on vahvistuslevyn paksuus. Ennen varsinaista pinta-alojen kompensointilaskentaa, tulee myös tarkistaa yhdeputken ja kammion vaipan lujuusarvojen suhde (S_n)/(S_v). Mikäli yhdeputken materiaalin lujuus on alhaisempi kuin kammion lujuus, yhteen vahvistavassa pinta-alassa huomioidaan heikennyskerroin. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot; ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

Näiden laskelmien jälkeen lasketaan tarvittava kompensointipinta-ala ASME Section I:n osassa PG-33 esitetyllä kaavalla (29) (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013):

$$A = dt_r F \quad (29)$$

jossa (d) on aukon halkaisija, (t_r) on kammion vaadittu paksuus ja (F) on kerroin, joka huomioi aukon tarkastelusuunnan vaikutuksen (kuvio 18). Kompensointiin käytössä olevat pinta-alat saadaan puolestaan neljästä eri alasta (A_1), (A_2), (A_3) ja (A_4). Näistä

saatava kokonaispinta-ala tulee olla suurempi kuin tarvittava kompensointiala (A).
(ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)



KUVIO 18. Lujuusvaihtelua kompensoiva kerroin F (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

Kompensointipinta-aloja määritettäessä käytetään kahta eri laskentatapaa riippuen siitä, onko yhdeliitos läpimenevä vai ei. Esimerkiksi hiekkalukkokomponentissa ei läpimeneviä yhteitä ole, joten käydään läpi tähän tarkoitukseen soveltuva laskenta. Näin ollen kompensointialat saadaan kaavoista (30), (31), (32) ja (33) (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013). Kaavan (30) kohdalla saaduista arvoista valitaan suurempi, ja kaavan (31) kohdalla saaduista arvoista valitaan pienempi. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013) Kaavojen mukaan:

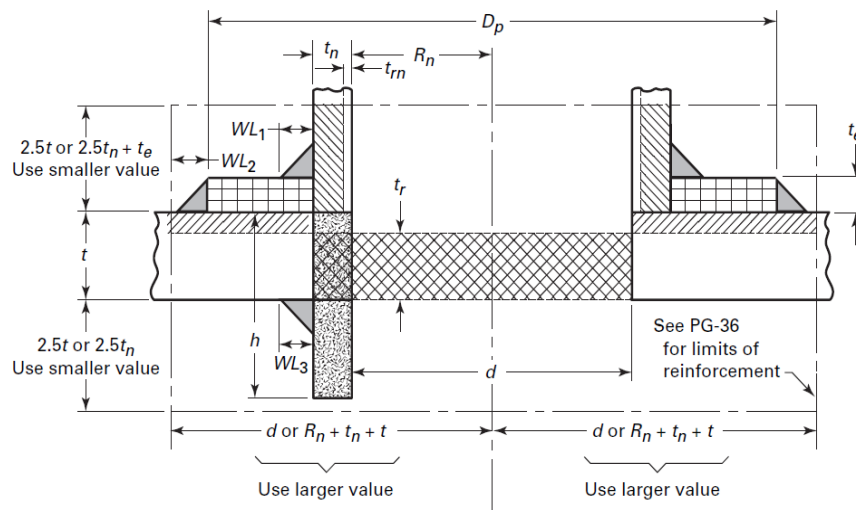
$$A_1 = d(t - Ft_r) \text{ tai } 2(t + t_r)(t - Ft_r) \quad (30)$$

$$A_2 = 2(t_n - t_{rn})(2,5t_{f_{r1}}) \text{ tai } 2(t_n - t_{rn})(2,5t_n + t_e)f_{r1} \quad (31)$$

$$A_3 = 0 \quad (32)$$

$$A_4 = (WL_1)^2 f_{r2} \quad (33)$$

joissa (A_1) on vapaana oleva kompensointipinta-ala runkoputkessa, (A_2) on vapaana oleva ala yhteessä, (A_3) on yhteen vaipan sisään menevän osan vahvistava ala ja (A_4) on hitsisauman vahvistava ala. (A_3) on nolla, mikäli yhdeputki ei jatku runkoputken sisälle. Aiemmin mainittujen termien lisäksi (t_m) on vaadittu seinämänpaksuus saumattomassa yhdeputkessa, (f_{r1}) on S_n/S_v eli yhteen ja runkoputken jännitysten suhde, (f_{r2}) on samansuuruinen kuin (f_{r1}), jos vahvistuslevyä ei käytetä ja (WL_1) on hitsisauman pituusmitta. Pinta-alakompensoinnissa käytettäviä termejä selventää kuvio 19. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

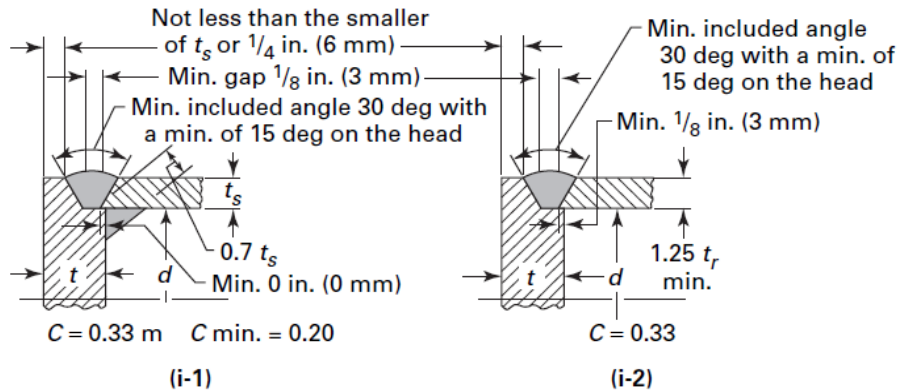


KUVIO 19. Pinta-alakompensointi (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

Lisäksi suurille aukkoille tulee tehdä vielä tarkastelu suurien aukkojen kompensointisäännöllä. Tämä tulee vastaan, jos yhteen sisähalkaisija on suurempi kuin puolet kammion sisähalkaisijasta. Mitoitussäännön mukaan $2/3$ tarvittavasta kompensointi pinta-alasta tulee sijaita aukon molemmilla puolilla pituudella, joka on $1/4$ aukon halkaisijasta. Näin ollen tarvittava kompensointi pinta-ala (A) ja kammiossa vapaana oleva kompensointiala (A_1) korvataan uusilla arvoilla. Muut pinta-alojen arvot eivät muutu. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

8.5 Pädyt

Päättyjen laskennassa tulee huomioida sekä aukolliset että umpinaiset päätylevyt. Laskennoissa käytetään pääsääntöisesti kuvion 20 mukaista i-2 -tyypin päätylevyä. Kuviossa 20 esiintyvä termi (C) on muotokerroin, jolla huomioidaan päädyn liittämistapa kammioon. C -kerroin on aukottomalla i-2 -päättytyypillä 0,33. Aukon vaikutus voidaan huomioida kaksinkertaistamalla C -kerroin tai tarkastelemalla aukkoa pinta-alakompensoinnilla. Esimerkiksi hiekkalukkokomponentin kohdalla on kuitenkin epäedullista käyttää tarkastusputkellisia päättyjä mitoitettaessa kerrointa 0,66. Aukkojen vaikutus on tämän takia tässä työssä huomioitu pinta-alakompensoinnilla. (Alin 2015, Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot; ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)



KUVIO 20. Päätylevyjen liittämätapojen rajoitteita (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

Käytettäessä päättytyyppiä i-2 on laskennassa huomioitava myös runkoputken (t_r) vaadittu seinämänpaksuus. Runkoputken paksuuden tulee olla vähintään $1,25t_r$, jotta kyseistä päättyä saa käyttää. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013) Aukottoman pyöreän päätylevyn laskentakaava (34) saadaan Section I:n osasta PG-31. Laskentakaavan (34) mukaan:

$$t = d\sqrt{CP/S} \quad (34)$$

jossa (t) on päätylevyn minimi vaadittu paksuus, (d) on halkaisija, (C) on päätylevyn liittämätavan muotokerroin ja (S) maksimi sallittu jännitys. (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section I 2013)

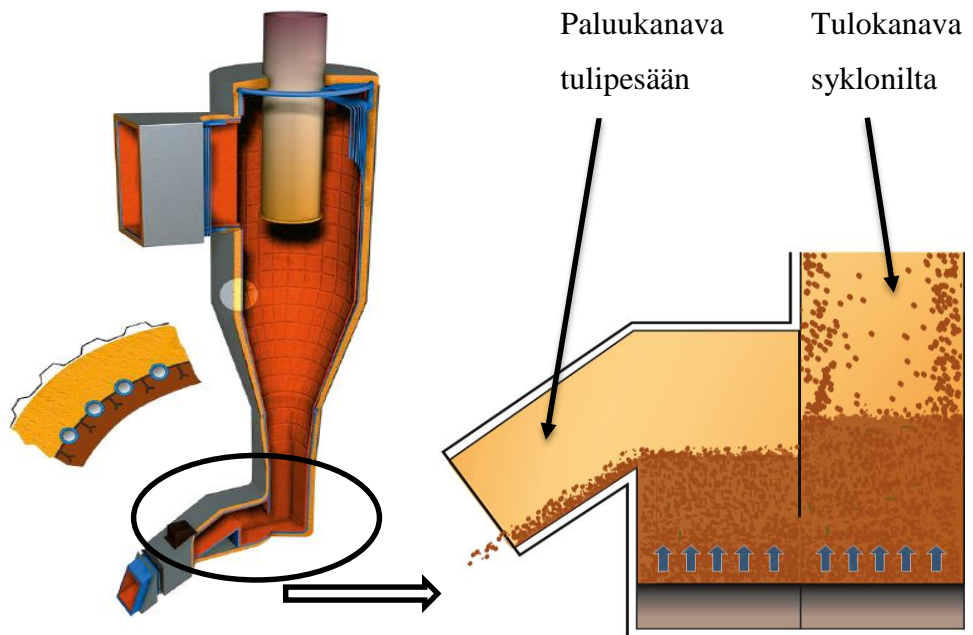
9 KONFIGUROIDUN HIEKKALUKON LASKENTA

9.1 Hiekkalukon rakenne

Valmet Technologies Oy:n nyt vakioitava uusiin hiekkalukkokomponentti ilman hiekkatulistinta rakentuu hyvin pitkälle samoista osista kuin CYMIC -kattilan muikin painerunko. Pääosia ovat jako- ja kokoojakammiot, seinäputket, pohjanputket, tarkastusputket, kiertoputkiyhteet ja levypäädty. Muita hiekkalukkoon kuuluvia osia ovat muun muassa pohjan ilmasuuttimet, tuhkanpoistoaukko, tarkastusaukko, tukikehärakenteet, tiivistyslevyt, kannatuskorvakkeet ja lämpötilan- sekä paineenmittausyhteet. Kaikki osat hitsataan yhteen niin, että ne muodostavat kaasutiiviin kokonaisuuden. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016)

CYMIC -kattilan hiekkalukon ulkoseinämät, samoin kuin syklonin ulkoseinämät, rakentuvat putki-evä-putki -membranerakenteesta. Seinämät ovat sisältä päin muurattu ja ulkoa päin eristetty. Hiekkalukko on näin ollen vesi-höyry -jäähdytetty, eriste estää lämmön karkaamista ja muuraus suojaa leijutetun hiekan aiheuttamaa sisäistä kulumista. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016)

Hiekkalukko muodostaa itsessään kaksi erillistä kuplivaa hiekkatasoa, joita hallitaan hiekkalukon pohjalla olevilla ilmasuuttimilla. Hiekka valuu ensin syklonista kanavaa pitkin alaspäin ja muodostaa ylemmän hiekkatason. Ennen paluukanavaa tulipesään muodostuu toinen hieman alempana oleva hiekkataso. Näin ollen palamattomat partikkelit siirtyvät hiekan mukana takaisin tulipesään ja savukaasujen virtaus vastakkaiseen suuntaan estyy. (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016) Kuviossa 21 on esitetty hiekkalukon ja syklonin membranerakenne sekä yksinkertaistettu malli hiekkalukosta.



KUVIO 21. Hiekkalukon/ syklonin rakenne ja hiekkalukon malli (Valmet Technologies Oy: MyAcademy 2016, muokattu)

9.2 Hiekkalukon konfigurointi

Konfiguroinnilla tarkoitetaan standardimallin luomista, joka on muunneltavissa projekti-kohtaisesti ennalta määritettyjen parametrien mukaan. Esimerkiksi kattilarakenteissa on monia komponentteja, joita voidaan ja kannattaa standardisoida. On ylimääräistä työtä suunnitella ja mitoittaa hyväksi koettua mallia tai osakokonaisuutta uudelleen jokaisen uuden projektin kohdalla, mikäli se voidaan yrityksen sisällä vakioida. Näin säästetään suunnittelu-, valmistus- ja materiaalikustannuksissa, ja resursseja voidaan keskittää paremmin projektien varsinaisiin ongelmakohtiin. Hiekkalukon kohdalla arvioidut kustannussäästöt on esitetty taulukossa 4. (Heino 2016, Haastattelu)

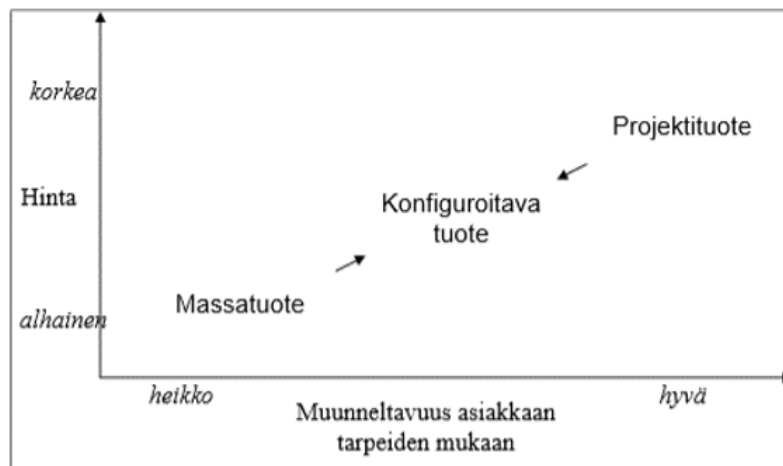
TAULUKKO 4. Hiekkalukon kustannussäästöt (Heino 2016, Haastattelu)

Kustannuskohteet	Säästöt (%)
Suunnittelukustannukset	70 %
Valmistuskustannukset	30 %
Materiaalikustannukset	10 %

Vaikka komponentteja konfiguroidaan, ei se tarkoita massatuotteisiin siirtymistä. Konfiguroitava tuote sijoittuu yksilöllisen projektituotteen ja massatuotteen väliin. Näin

hinta saadaan pysymään kohtuullisella tasolla ja muunneltavuutta asiakkaan tarpeiden mukaan löytyy myös (kuvio 22). Konfigurointi vähentää tilauksen läpimenoaika, parantaa tuotteen laatua ja mahdollistaa standardisoitujen osien käytön. Lisäksi se pienentää varastoja, helpottaa muutosten hallintaa ja parantaa yrityksen kilpailutilannetta. (Sarinko 1999, 23-31)

Kattiloiden kokoluokat ja suunnitteluarvot ovat aina projektikohtaisia, jolloin myös hiekkalukolle on löydettävä muutama eri kokoluokka. Näin ollen täysin identtistä hiekkalukkoa ei voida suunnitella, vaan tarvitaan suunnittelukonfiguraattoria. Optimoimalla painerajoja ja putkien materiaaleja ja -kokoja, sopivat raja-arvot eri kokoluokan hiekkalukkokomponenteille ovat löydettävissä.



KUVIO 22. Konfiguroinnin vaikutus tuotteen hintaan ja muunneltavuuteen (Sarinko 1999, 23-31)

9.3 EN- ja ASME -materiaalien ja putkikokojen optimointi

Painelaiteteräsmateriaaleja ja -putkikokoja on useita erilaisia ja valintojen tekeminen vaatii oikeanlaista optimointia. Aina ei ole tarkoituksenmukaista hakea edullisinta materiaalia tai putken minimiä seinämänpaksuutta, vaan myös monet muut asiat vaikuttavat valintoihin. Putkien materiaaleja ja kokoluokkia voidaan arvioida esimerkiksi painoarvotaulukolla (taulukko 5).

TAULUKKO 5. Putkien valinnan painoarvotaulukko

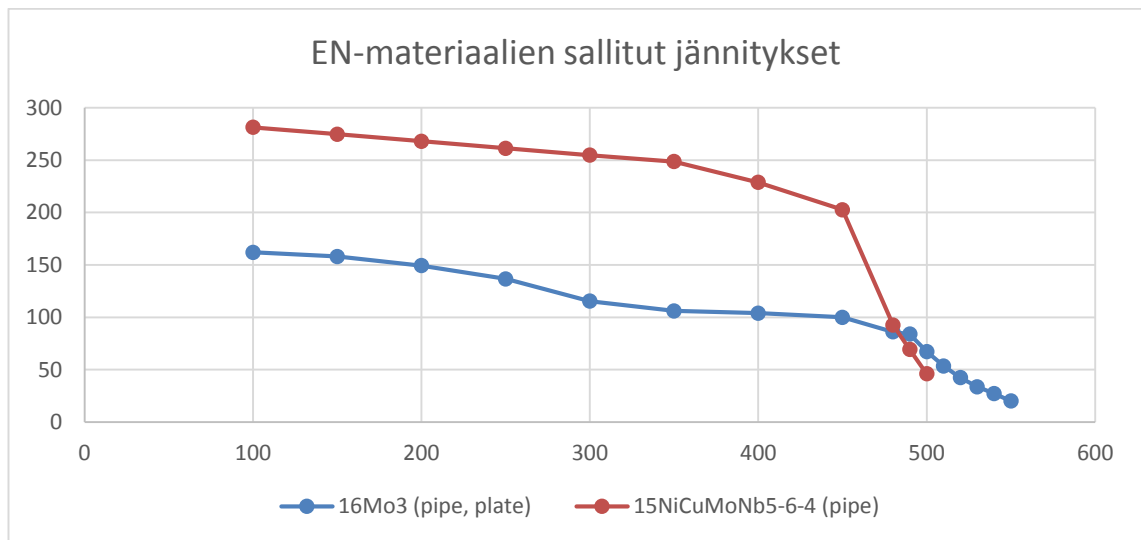
Arviointikriteeri	Painoarvo (%)
Kilohinta	15
Massa	5
Lujuusarvot	20
Hitsattavuus	10
Muovattavuus	10
Korroosionkesto	5
Toimitusaika	15
Monikäyttöisyys	20
Yht.	100

Putkien kilo- tai metrihinta on yksi lähtökohta putkien valinnassa. Liian kallista materiaalia ei kannata ostaa, mikäli kohteessa riittää esimerkiksi vähemmän seostettu teräs. Lujuusarvot ovat tärkeimpiä putken valintaan vaikuttavia asioita, mutta myös muut materiaaliominaisuudet kuten massa, hitsattavuus, muovattavuus ja korroosionkesto on otettava huomioon. Hiekkalukon seinäputket ovat muurauksen alla, joten korroosionkestolle ei suuria vaatimuksia tarvitse asettaa. Hitsattavuus ja muovattavuus ovat tärkeitä ominaisuuksia, koska rakenteen liitokset tehdään hitsaamalla ja putkia taivutetaan monissa kohdissa. Jos taas putken seinämänpaksuus kasvaa liian suureksi, kasvattaa tämä rakenteen massaa ja vaikuttaa näin kattilan kannakointiin. Myös virtausominaisuudet prosessin kannalta muuttuvat.

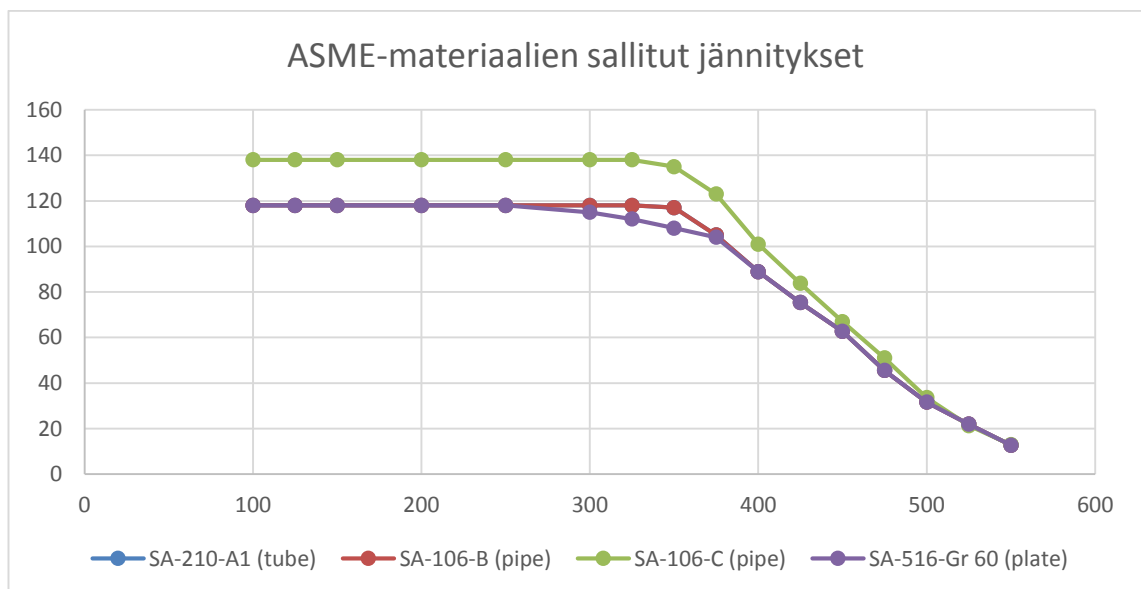
Putkien toimitusajalla on suuri vaikutus koko projektin edistymiseen. Putkien tulee olla pääsääntöisesti sellaista materiaalia ja kokoluokkaa, jota on helposti ja nopeasti saatavilla. Putkien monikäyttöisyys on lisäksi hyvin tärkeä huomioon otettava asia, koska tällöin putkea voidaan käyttää myös painerungon muihin kohteisiin ja ostaa suurempia määriä varastoitavaksi tulevia projekteja varten. Kriteerit huomioiden, EN -materiaaleissa päädyttiin lopulta teräksiin 16Mo3 ja 15NiCuMoNb5-6-4. ASME -materiaaleissa valittiin teräkset SA-210-A1, SA-106-B, SA-106-C ja SA-516-Gr 60. Valittujen putkien mittatiedot löytyvät Valmetin tietokannasta.

Valittujen EN- ja ASME -materiaalien sallitut jännitykset lämpötilan funktiona on kuvattu kuvioissa 23 ja 24. Kuviot on laadittu EN -standardissa (SFS-EN 10216-2: Sauttomat painelaiteteräspanputket 2014) ja ASME -painelaitetekoodissa (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section II Materials Part D 2013) taulukoitujen materiaaliarvojen

perusteella. Arvot löytyvät myös liitteistä 2 ja 3. Sallituissa jännityksissä huomioidaan sekä materiaalien kuumalujuus että virumislujuus. Kuvaajista huomataan, että EN -mitoitus sallii kyseisillä materiaalivalinnoilla suuremmat jännitykset matalammissa lämpötiloissa kuin ASME -mitoitus. Sallitut jännitykset kuitenkin tasaantuvat lähestyttäessä 500°C:ta. Hiekkalukon käyttölämpötila-alue on yleensä noin 300 - 400°C:n välillä, joten materiaalit sopivat hyvin tähän käyttötarkoitukseen.



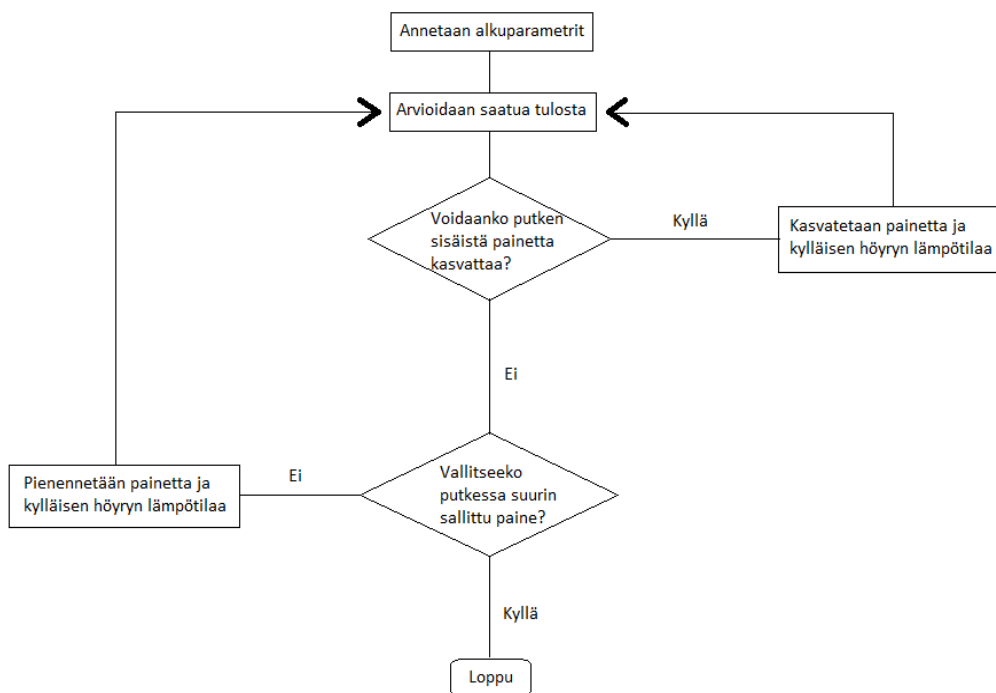
KUVIO 23. EN -materiaalien sallitut jännitykset lämpötilan funktiona



KUVIO 24. ASME -materiaalien sallitut jännitykset lämpötilan funktiona

9.4 Laskentaohjelmat

EN -standardin ja ASME -koodin mukaiset laskutoimitukset tehdään pääsääntöisesti yrityksen painerunko-osastolla käytössä olevilla erilaisilla laskentaohjelmilla. EN -standardin osalta käytetään Excel-pohjaista ohjelmaa. ASME -koodissa voidaan käyttää kahta erilaista ohjelmaa, joista toinen on Excel-pohjainen ohjelma ja toinen Fortran-ohjelma. Ohjelmien hyötynä on iteratiivisen lähestymistavan mahdollistaminen, jolloin sopivaa ratkaisua voidaan etsiä muuttamalla vain annettuja alkuparametreja. Esimerkiksi jos laskentapaineen alkuarvoksi on annettu 13,0 MPa ja putken sisäinen paine voi olla selkeästi suurempi, nostetaan laskentapainetta 15,0 MPa:iin. Mikäli putken sallittu jännitys ei ylitä, mutta raja-arvo on jo hyvin lähellä, nostetaan paineen määrää hieman vähemmän. Samaa kaavaa jatketaan, kunnes raja-arvo löydetään. Iterointimenettelyä havainnollistaa kuvio 25.



KUVIO 25. Lohkokaavio ohjelmien iterointimenettelystä

EN- ja ASME -pohjaiset Excel-ohjelmat on jaettu useammalle eri välilehdelle, joista löytyvät tyypillisimmät yrityksen käyttämät standardin mukaiset laskentatapaukset. Välilehdiltä löytyvät muun muassa putkien, kammioiden ja lieriöiden vaadittujen seinämien laskeminen sekä yhteiden ja reikäkenttien sallittujen jännitysten laskeminen. Ohjelmiin annetaan alkuparametrit ja alasvetovalikoista valitaan, mitä materiaaleja ja put-

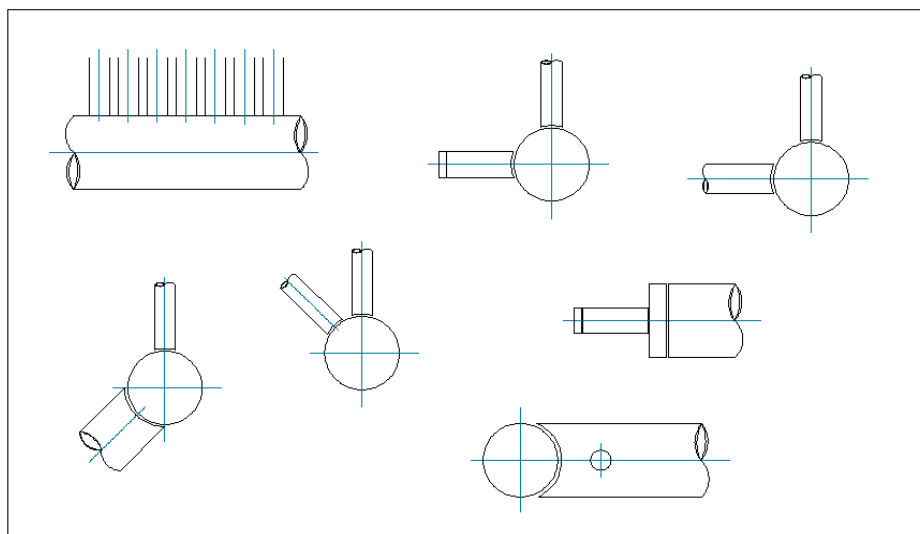
kikokoja aiotaan käyttää. ASME:n Fortran-ohjelmasta löytyy myös joitain sellaisia laskentatapauksia, mitä Excel-ohjelmassa ei vielä tällä hetkellä ole.

Ohjelmien käyttäminen edellyttää suunnittelijalta tuntemusta standardeista ja muusta oheistiedosta. Ohjelmien sisään on rakennettu joitain huomautuksia virheiden välttämiseksi, mutta kaikista yksittäisistä kohdista ohjelmat eivät kuitenkaan huomautta. Suunnittelijan on ymmärrettävä kokonaisuus, mitä tehdään ja miksi, jotta päästään oikeisiin valintoihin.

9.5 EN -laskentatapaukset

Hiekkalukon EN -laskennassa laskentatapauksia tulee helposti toistakymmentä. Kaikki tarkasteltavat kohteet lasketaan aluksi 130 bar:n paineella, jonka tarkoituksena on saada selville kriittisin eli mitoittavin tapaus. Myöhemmissä laskennoissa tarkasteluvälinä käytetään 130-210 bar:a, joka soveltuu luonnonkierrossa oleville kattilan painerunkorakenteille. EN:ssä olevia laskentatapauksia (kuvio 26) ovat:

- Yksittäiset putket ja kammiot
- Kammioihin liittyvät yksittäiset yhteet
- Kammioihin liittyvät vierekkäiset yhteet eri putkijaoilla ja eri kulmissa
- Kammioiden päätylevyt aukottomina ja aukollisina
- Tarkastusputkien päätylevyt

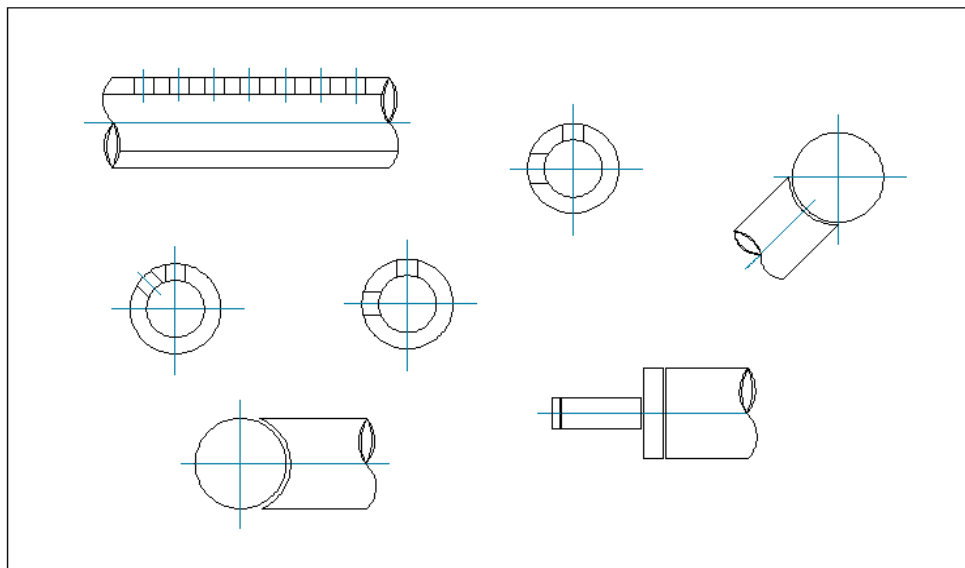


KUVIO 26. Hiekkalukon EN -laskentatapauksia

9.6 ASME -laskentatapaukset

Hiekkalukon ASME -laskennassa laskettavia kohteita on lähestulkoon sama määrä kuin EN:ssä. EN:ään verrattuna laskentatapaukset ovat hieman erilaisia, mutta hiekkalukon rakenne pysyy muuten samanlaisena. Kaikki laskentatapaukset käsitellään aluksi 130 bar:n paineella mitoitettavan kohteen löytämiseksi. ASME:ssä olevia laskentatapauksia (kuvio 27) ovat:

- Yksittäiset putket (tubet, minimiseinämällä)
- Yksittäiset putket (pipet, nimelliseinämällä)
- Kammioiden reikäkentät pitkittäisessä-, poikittaisessa- ja diagonaalisuunnassa
- Kompensoitavat yhteyt kammioissa ja kammioiden levypäädyissä
- Kammioiden ja tarkastusputkien päätylevyt



KUVIO 27. Hiekkalukon ASME -laskentatapauksia

10 PAINERAJOJEN MÄÄRITYS

10.1 Painerajojen määräytyminen EN -vesiputkikattilastandardissa

Tutkitaan aluksi EN -vesiputkikattilastandardin mukaan saatuja tuloksia painealueella 130-210 bar:a. Hiekkalukkoon syntyvä staattinen paine on projektikohtainen, joten se jätetään tässä vaiheessa huomioimatta. Varsinaisissa projektilaskennoissa tämä on huomioitava. Staattinen paine on tyypillisesti noin 3-4 bar:a (Heino 2016: Haastattelu). Laskentalämpötilana käytetään kylläisen höyryn lämpötilaa. Hiekkalukko on muurauksen johdosta säteilyltä suojattu ja vesihöyrykierrossa, joten lämpötilalisä on 20°C:tta. Suunnittelujännitykset saadaan laskettua EN -standardin mukaisista materiaaliarvoista.

Putkien ja kammioiden maksimipaineet yksittäisinä putkina ja valitut putkimateriaalit on esitetty taulukossa 6. Putket on nimetty käyttötarkoituksen mukaan. Taulukossa 7 on esitetty yksittäisten yhteiden maksimipaineet ja taulukossa 8 vierekkäisten seinäputkiyhteiden maksimipaineet pitkittäisellä ja poikittaisella jaolla. Kammioiden ja tarkastusputkien päätylevyjien materiaalivalinnat ja maksimipaineet ilmenevät taulukosta 9. Tulokset on laskettu Valmetilla käytössä olevilla laskentaohjelmilla ”EN -standardin mukainen mitoitus” -kappaleessa esitettyjen kaavojen mukaisesti. Putkien ja kammioiden mittatiedot löytyvät Valmetin tietokannasta.

TAULUKKO 6. EN -standardin mukaiset yksittäiset putket ja kammiot

Putket ja kammiot	Materiaalit	P _{max} (MPa)
Seinäputki 1 *)	16Mo3	19,3
Seinäputki 2 *)	16Mo3	21,0
Tarkastusputki	16Mo3	21,0
Pohjanputki	16Mo3	19,9
Kiertoputkiyhde *)	16Mo3	20,4
Kammio 1	16Mo3	21,0
Kammio 2	15NiCuMoNb5-6-4	21,0

*) Tuloksissa taivutukset on huomioitu

TAULUKKO 7. EN -standardin mukaiset yksittäiset yhteet

Putki (liittyvä putki)	Kammio (runkoputki)	Pmax (MPa)
Seinäputki 1	Kammio 1 ja 2	21,0
Seinäputki 2	Kammio 1 ja 2	21,0
Tarkastusputki	Kammio 1 ja 2	21,0
Pohjanputki	Kammio 1 ja 2	21,0
Kiertoputkiyhde	Kammio 1 ja 2	21,0
Kammio 1	Kammio 1 ja 2	21,0
Kammio 2	Kammio 1 ja 2	21,0

TAULUKKO 8. EN -standardin mukaiset vierekkäiset yhteet

Putket (liittyvät putket)	Kammio (runkoputki)	Putkijako (pitk./ poik.)	Pmax (MPa)
Seinäputket 1 vierekkäin	Kammio 1	Pitkittäinen putkijako	14,9
Seinäputket 1 vierekkäin	Kammio 1	Poikittainen putkijako	17,3
Seinäputket 2 vierekkäin	Kammio 1	Pitkittäinen putkijako	15,9
Seinäputket 2 vierekkäin	Kammio 1	Poikittainen putkijako	18,9
Seinäputket 1 vierekkäin	Kammio 2	Pitkittäinen putkijako	19,3
Seinäputket 1 vierekkäin	Kammio 2	Poikittainen putkijako	21,0
Seinäputket 2 vierekkäin	Kammio 2	Pitkittäinen putkijako	20,3
Seinäputket 2 vierekkäin	Kammio 2	Poikittainen putkijako	21,0

TAULUKKO 9. EN -standardin mukaiset päätylevyt

Päätylevy (liitettävä)	Kammio/ putki	Materiaalit (päätylevy)	Pmax (MPa)
Päätylevy 1	Kammio 1	16Mo3	21,0
Päätylevy 2	Kammio 2	16Mo3	21,0
Päätylevy 3	Tarkastusputki	16Mo3	21,0

Tuloksista nähdään, että valituilla putkimateriaaleilla ja -kokoluokilla yksittäiset putket ja kammiot kestävät hyvin sisäistä painetta tarkasteltavalla painealueella. Seinäputken 1 sallittu jännitys ylittyy 193 bar:n kohdalla, pohjanputken 199 bar:n kohdalla ja kierto-putkiyhteen 204 bar:n kohdalla taivutukset huomioon ottamalla. Muut putket kestävät koko tarkastelualueella. Yksittäisistä yhteistä kaikki tarkasteltavat kohteet kestävät hyvin 210 bar:n painerajalle, mikä johtuu kammioiden vahvistavasta vaikutuksesta. Koska kaikki yksittäiset putket eivät kuitenkaan 210 bar:n painetta sallituissa rajoissa kestä, ovat yksittäiset putket tässä vaiheessa määrääviä.

Vierekkäisistä yhteistä on taulukossa 8 esitetty seinäputkien 1 ja 2 liittymiset kammioihin 1 ja 2 pitkittäisellä ja poikittaisella jaolla. Hiekkalukossa on monia vierekkäisten yhteiden laskentatapauksia, mutta kriittisin tapaus muodostuu vierekkäisten seinäputkien ja heittoputkien yhteyteen. On siis syytä keskittyä näiden tarkasteluun. Taulukon 9 tuloksista nähdään, että poikittaisella jaolla olevat heittoputket kestävät suuremman paineen kuin pitkittäisellä jaolla olevat seinäputket. Tämä on ymmärrettävää, sillä sylinterin vaipan tangentiaalinen jännitys on sylinteriin syntyvistä jännityksistä suurin. Mitä pienempi pitkittäinen putkijako on, sitä suuremmaksi jännitys kammiossa muodostuu. Valitut päätylevyyt eivät EN -standardissa suurempaa tarkastelua vaadi.

10.1.1 Painerajan 149 bar:a määräytyminen

EN -standardin mukaisissa laskennoissa alimman painerajan määrittää vierekkäiset seinäputkiyhteet (seinäputket 1), jotka liittyvät hiekkalukon ylä- ja alakammioihin (kammiot 1). Taulukossa 8 on esitetty, että iterointimenettelyllä saatu alin paineraja asettuu 149 bar:n kohdalle.

Laskennoissa edetään EN -vesiputkikattilastandardin antaman ohjeistuksen mukaisesti laskemalla aluksi yksittäisen seinäputken 1 tarvittava seinämänpaksuus 149 bar:ssa. Kylläisen höyryn lämpötila tässä paineessa on noin 342 °C:ta, lämpötilalisä 20°C:ta ja suunnittelujännitys, joka perustuu ($R_{p0,2}$) -venymisrajaan, on noin 139 N/mm². Laskennassa otetaan huomioon putken valmistuksen alitoleranssi ja korroosiovara. Putken tarvittava seinämänpaksuus saadaan laskettua EN -standardin mukaisessa mitoituksessa mainituilla kaavoilla (8) ja (9).

Seuraavaksi varmistetaan, että kammion 1 seinämässä on riittävästi seinämänpaksuutta tulevia yhdelaskuja varten. Lujuuskertoimen arvo on tässä vaiheessa 1, mutta kammiin porattavien reikien myötä kammion paineenkesto heikkenee ja lujuuskerroin vastaavasti pienenee. Kammion 1 seinämänpaksuus saadaan laskettua kaavalla (10), johon huomioidaan vielä vaaditut lisät.

Yksittäisten ja vierekkäisten seinäputkiyhteiden laskentaa varten tulee määrittää paineen alaiset ja painetta kantavat pinta-alat. Lisäksi lasketaan vahvistavat pituudet (l_{rs}) ja (l_{rb}). Yksittäisenä yhteenä seinäputken 1 arvot saadaan laskettua kuvion 10 ja kaavojen (11)

ja (12) avulla. Saadut arvot sijoitetaan yksittäisten yhteiden laskentakaavaan (14), jolla varmistetaan, ettei sallittu jännitys ylity.

Vierekkäisten yhteiden laskennassa pätevät samat vahvistavat pituudet (l_{rs}) ja (l_{rb}). Painetta kantavan kannaksen pinta-alana käytetään kuitenkin aukkojen keskipisteiden välistä diagonaalista pituutta ja muita kuvion 11 mukaisia pinta-alasuureita. Saadut arvot sijoitetaan vierekkäisten yhteiden laskentakaavaan (16).

Kammion vierekkäisten yhteiden antama lujuuskerroin saadaan kaavasta (17), joka voidaan sijoittaa alkuperäiseen kammion seinämänpaksuutta kuvaavaan lausekkeeseen lisät mukaan lukien. Näin varmistetaan siitä, että kammion seinämä on riittävä eikä sallittu jännitys ylity.

10.1.2 Painerajojen 175 bar:a ja 199 bar:a määräytyminen

175 bar:n paineraja määräytyy samalla tavoin kuin edellä esitetty 149 bar:n paineraja. Määrittävänä tekijänä ovat vierekkäiset seinäputkiyhteet (seinäputket 1) ja painerajaa saadaan nostettua vaihtamalla kammion materiaali lujempaan materiaaliin (kammio 2). Pienemmällä seinämällä olevat seinäputket (seinäputket 1) riittävät 193 bar:n asti taivutukset huomioituna, mutta astetta suurempaan seinämään (seinäputket 2) siirrytään kuitenkin 175 bar:n painerajalla.

199 bar:n painerajan määrittää hiekkalukon pohjanputket, joiden seinämää jouduttaisiin kyseisen paineen ylittyessä kasvattamaan. 199 bar:a on luonnonkiertokattiloissa kuitenkin jo melko suuri paine ja tämän painerajan ylittäviä projekteja tulee harvemmin vastaan.

10.1.3 Vahvistavien pituuksien l_{rs} ja l_{rb} tarkastelu

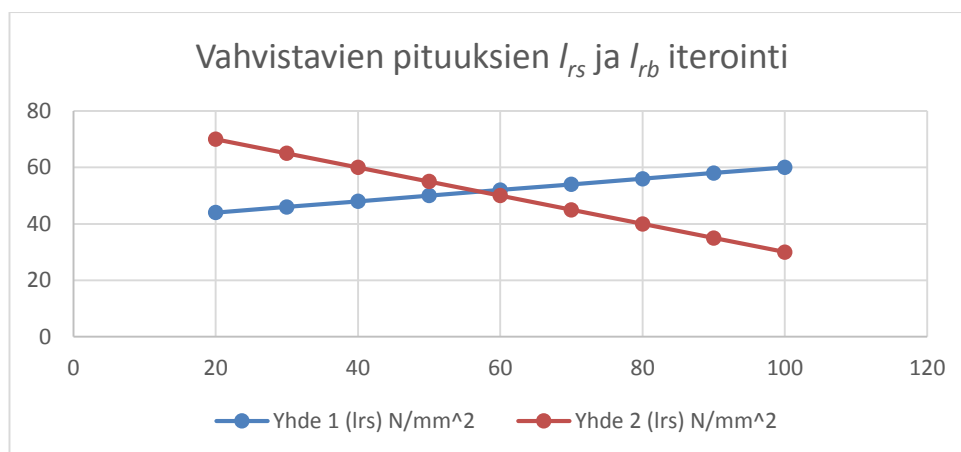
Eräs tarkastelua vaativa kohde on hiekkalukon kulmissa esiintyvä yksittäisten yhteiden vahvistavien pituuksien päällekkäisyys. Tapausta ei voida tarkastella vierekkäisinä yhteinä, koska putket liittyvät eri kammioihin eivätkä näin ollen muodosta vierekkäisten yhteiden tapausta. Tässä tapauksessa tarvitaan vahvistavien pituuksien (l_{rs}) ja (l_{rb}) ite-

rointimenettelyä. Iteroimalla haetaan tarvittavat vahvistavat pituudet niin, että muodostuvat jännitykset yhteiden ympärillä ovat yhtä suuret. ASME:ssa tilanne ei muodostu samalla tavalla tarkastelua vaativaksi.

Iterointi toteutetaan vähentämällä (l_{rs}):n vahvistavaa vaikutusta ja puolestaan nostamalla (l_{rb}):n vahvistavaa vaikutusta taulukon 10 mukaan (esimerkkitapaus). Näin saadaan kuvio 28, jossa käyrien risteyskohta ilmoittaa optimin arvon (l_{rs}):lle vaaka-akselilla ja (l_{rb}):lle pystyakselilla. Tällöin jännitykset ovat molemmille yhteille yhtä suuret. Todellisuudessa riittäisi todeta, että yhteiden sallitut jännitykset eivät ylitä, mutta tilanne tulee kuitenkin huomioida ja laskea.

TAULUKKO 10. l_{rs} :n ja l_{rb} :n iterointiarvot esimerkkitapauksessa

	Yhde 1 (l_{rs}) N/mm ²	Yhde 2 (l_{rb}) N/mm ²
100	60	30
90	58	35
80	56	40
70	54	45
60	52	50
50	50	55
40	48	60
30	46	65
20	44	70



KUVIO 28. l_{rs} :n ja l_{rb} :n optimit jännitysarvot esimerkkitapauksessa

10.2 Painerajojen määräytyminen ASME -painelaitekoodissa

Tutkitaan seuraavaksi ASME -painelaitekoodin mukaan saatuja tuloksia painealueella 130-210 bar:a. Samaan tapaan kuin EN -standardin mukaisissa laskennoissa, ei staattista painetta tässä vaiheessa huomioida. Projekttilaskennoissa pipe -materiaalien kohdalla on staattinen painelisa huomioitava. Metallin suunnittelulämpötilana käytetään kylläisen höyryn lämpötilaa ja lämpötilalisänä EN -standardin mukaista lisää. Materiaalikohtaiset sallitut jännitykset saadaan ASME Section II Part D:stä.

Yksittäisten putkien ja kammioiden maksimipaineet ja valitut tube- ja pipe -materiaalit on esitetty taulukossa 11. Putket on nimetty käyttökohteen mukaan. Taulukossa 12 on esitetty kolmen eri reikäkentätapauksen maksimipaineet ja taulukossa 13 kompensoitavien yhteiden maksimipaineet. Kammioiden ja -tarkastusputkien päätylevyjien materiaalit ja maksimipaineet on esitetty taulukossa 14. Tulokset on laskettu ”ASME -koodin mukainen mitoitus” -kappaleessa esitettyjen kaavojen mukaisesti. Tube- ja pipe -putkien ja kammioiden mittatiedot löytyvät Valmetin tietokannasta.

TAULUKKO 11. ASME -koodin mukaiset yksittäiset putket ja kammiot

Putket ja kammiot	Materiaalit	Pmax (MPa)
Seinäputki 1 (tube) *)	SA-210-A1	18,4
Seinäputki 2 (tube) *)	SA-210-A1	20,5
Tarkastusputki 1 (pipe)	SA-106-B	21,0
Tarkastusputki 2 (pipe)	SA-106-B	21,0
Pohjanputki 1 (tube)	SA-210-A1	18,4
Pohjanputki 2 (tube)	SA-210-A1	21,0
Kiertoputkiyhde (pipe) *)	SA-106-B	20,5
Kammio (pipe)	SA-106-C	21,0

*) Tuloksissa taivutuksia ei ole huomioitu

TAULUKKO 12. ASME -koodin mukaisia kammion reikäkenttiä

Kammion aukot	Aukkojen jako (pitk./ poik.)	Pmax (MPa)
Seinäputkien 1 aukot vierekkäin	Pitkittäinen jako	18,7
Seinäputken 1 aukko ja tarkastusputken 1 aukko vierekkäin	Poikittainen jako	21,0
Pohjanputkien 1 aukot vierekkäin	Pitkittäinen jako	21,0

TAULUKKO 13. ASME -koodin mukaiset kompensoitavat yhteet

Kammion yhde	P _{max} (MPa)
Kiertoputkiyhde (pipe)	18,5
Kammio (pipe)	21,0
Kammion levypääty tarkastusputkella 1 (pipe)	19,7
Kammion levypääty tarkastusputkella 2 (pipe)	21,0

TAULUKKO 14. ASME -koodin mukaiset päätylevyt

Päätylevy (liitettävä)	Kammio/ putki	Materiaalit (pääty-levy)	P _{max} (MPa)
Päätylevy 1	Kammio	SA-516-Gr 60	21,0
Päätylevy 2	Tarkastusputki 1	SA-516-Gr 60	18,0
Päätylevy 2	Tarkastusputki 2	SA-516-Gr 60	21,0

Tuloksien perusteella voidaan todeta, että yksittäisistä tube- ja pipe -putkista paineraja tulee ensimmäisenä vastaan minimiseinämällä tilattavilla seinäputkilla ja pohjanputkilla, kummallakin 184 bar:n kohdalla. Näissä painerajoissa putkien taivutuksia ei ole kuitenkaan vielä huomioitu, joten painerajat tulee todellisuudessa määrittää saatuja tuloksia alemmas. Taulukossa 12 esitettyjen reikäkenttätapauksien kohdalla paineraja tulee nopeimmin vastaan vierekkäisten seinäputkien (seinäputket 1) aukoilla. Kammioon poratut vierekkäiset aukot kestävät ASME -laskennoissa joka tapauksessa hyvin painetta.

Kompensoitavista yhteistä kammion kiertoputkiyhteet kestävät 185 bar:n paineeseen asti. Tämä on kompensoitavien yhteiden kohdalla ensimmäisenä vastaan tuleva paineraja. Eräs huomiota vaativa kohde on kammion levypäädyn aukko tarkastusputkelle, joka tulee edullisimmaksi laskea kompensointimenettelyllä. Näin aukollisen levypäädyn paksuus pysyy kohtuullisena. Tarkastusputkessa 1 päätylevyä 2 saa puolestaan käyttää 180 bar:n paineeseen asti (taulukko 14). Tämä johtuu levypäätytyypin vaatimuksesta, jonka mukaan runkoputken paksuuden tulee olla vähintään 1,25t.

10.2.1 Painerajan 175 bar:a määräytyminen

ASME -koodin mukaisessa laskennassa 175 bar:n painerajan määrittää valituilla putkimateriaaleilla ja -kokoluokilla pienemmällä seinämällä olevat yksittäiset seinäputket (seinäputket 1), kun taivutukset otetaan huomioon. Seinäputket ovat tube -materiaalia ja

mitoitetaan näin ollen minimiseinämällä. Alitoleranssia ei laskennoissa siis huomioida. Todellisuudessa tilattavan putken seinämänpaksuus on kuitenkin yleensä lähellä nimelliseinämää, jonka voidaan ajatella helpottavan putkitaivutuksien kohdalla vaadittavaa minimiseinämän paksuutta.

Laskentapaineena käytetään tube -materiaalien mukaista laskentapainetta, johon staattista painelisää ei koodin mukaan huomioida. Suurimpana sallittuna sisällön lämpötilana käytetään kylläisen höyryn lämpötilaa, johon lisätään EN:n mukainen lämpötilalisä 20 °C:ta. Näin ollen metallin suunnittelulämpötilaksi 175 bar:ssa muodostuu noin 375 °C:ta. Suunnittelujännitys perustuu ASME Section II Part D:ssä mainittuun arvoon 104,9 N/mm². ASME -koodin mukaisen yksittäisen seinäputken 1 tarvittava seinämänpaksuus lasketaan kaavalla (20), mihin lisätään korroosiovara.

Taivutuksen ulkosyrjälle jää oheneisvaraa hyvin vähän, mutta mikäli putken todellinen seinämä on lähempänä nimelliseinämää, on oheneisvara riittävä. Tämä tulee kuitenkin huomioida ja tarkastaa vielä projektikohtaisesti.

10.2.2 Painerajan 185 bar:a määräytyminen

185 bar:n painerajan määräävät hiekkalukon kammioihin liittyvät kiertoputkiyhteet, mikäli yhteiden seinämää ei suurenneta. Reikäkentätarkastelua ei voida yhteen suuruuden vuoksi käyttää, vaan tarvitaan pinta-alakompensointilaskentaa. Kammio ja kierto-putkiyhde ovat pipe -materiaalia, joten laskennassa huomioidaan valmistuksen alitoleranssi. Lisäksi mukaan lasketaan korroosiovara. Staattinen painelisä tulee projektitas-kuissa huomioida, mutta tässä vaiheessa se jätetään huomioimatta. Metallin suunnittelulämpötila ja suunnittelujännitys määräytyvät samaan tapaan kuin 175 bar:n painerajan kohdalla.

ASME -painelaitekoodin mukaan aluksi lasketaan kammion ja yhdeputken tarvittavat seinämänpaksuudet aiemmin esitettyjen kaavojen (20) ja (21) mukaan. Kammion ja yhdeputken vahvistavan alueen pituudet saadaan kaavoista (27) ja (28). Näitä tuloksia tarvitaan ennen kuin voidaan siirtyä varsinaiseen pinta-alakompensointilaskentaan. Tarvittava kompensointipinta-ala (A) ja kompensointiin käytössä olevat pinta-alat (A_1), (A_2),

(A_3) ja (A_4) lasketaan kaavojen (37) - (41) mukaisesti. Kompensointiin käytettävissä olevat pinta-alat lasketaan yhteen ja tarkastetaan, onko pinta-alaa riittävästi käytössä.

Laskujen perusteella nähdään, että kompensointipinta-ala riittää. On kuitenkin huomiotava vielä suurien aukkojen kompensointisääntö ja korvattava pinta-alat (A) ja (A_I) uusilla arvoilla kompensointisäännön mukaisesti. Myös suurien aukkojen kompensointisäännöllä laskettaessa kompensointipinta-ala riittää.

11 VAKIODOKUMENTAATION KEHITTÄMINEN

11.1 Lähtökohta

Vakiodokumentaation kehittämisessä tarkastuslaitoksia varten on tarkoituksena muun muassa vähentää ylimääräistä työtä ja pienentää syntyvien virheiden määrää. Näin parannetaan myös laatua. Ilmoitetut laitokset kuten Inspecta ja Dekra haluavat selkeän esityksen siitä, että jokainen mahdollinen laskentatapaus on käsitelty ja ne täyttävät kaikki vaatimukset. Tällä hetkellä tarkastuslaskut tehdään niin, että jokainen laskee ne omalla tavallaan ja mallia otetaan muun muassa aikaisemmista projekteista. Standardisoidussa hiekkalukossa putkivalinnat ja putkien sijoittelu tehdään ennalta määrätyn mallin mukaisesti, jolloin myös vakiodokumentaatiolle on selkeä tarve.

11.2 Vaihtoehdot

Vakiodokumentaation kehittämistä voidaan lähestyä kahdesta eri näkökulmasta. Ensimmäisenä tulee arvioida, miten dokumentti laaditaan ja toiseksi millainen dokumentti on lopullisessa muodossaan. Lähtökohtia ovat selkeys, helppous, yksinkertaisuus ja yksiselitteisyys. Näistä näkökulmista ajateltuna erilaisiksi vaihtoehdoiksi nousevat kolme erilaista tapaa toteuttaa vakiodokumentaatio. Näitä ovat:

- Luettelomainen informatiivinen dokumentti laskentaohjelmien tueksi, missä painerajat, putkimateriaalit ja -kokoluokat on ilmoitettu
- Laskentaohjelmiin lisättävä osa, joka rajaa valmiiksi valitun komponentin putkimateriaalit ja -kokoluokat painerajan mukaan
- Valmis mallidokumentti, jossa kaikki laskentatapaukset on käsitelty painerajojen mukaan oikeilla parametreilla

Ensimmäinen vaihtoehto toimii hyvänä tukena, mutta laskentatapauksen läpikäyminen ja valmiin dokumentin ulkoasu jäävät kuitenkin suunnittelijan vastuulle. Toinen vaihtoehto on jo parempi, koska tällöin laskentaohjelma ohjaa suunnittelijaa tekemään automaattisesti oikeat valinnat ja virheiden tekemisen todennäköisyys pienenee. Edelleen valmiin dokumentin laatiminen jää kuitenkin suunnittelijan vastuulle. Lisäksi laskentaohjelmaan

tehdyt muutokset vaativat aina verifiointia, joka hankaloittaa työn toteuttamista. Näin ollen kolmantena vaihtoehtona oleva valmis mallidokumentti täyttää parhaiten kehittämisen lähtökohdat ja lopulta päädyttiin tähän vaihtoehtoon.

11.3 Mallidokumentti

11.3.1 Mallidokumentin rakenne

EN- ja ASME -pohjaiset mallidokumentit on tehty niin, että dokumenteissa jokainen laskentatapaus on käyty läpi painerajojen mukaisilla arvoilla. Painerajat löytyvät erillisiltä välilehdiltä. Ensimmäisenä on kansilehti, josta löytyvät projektitiedot ja suunniteluarvot, ja tätä seuraavat varsinaiset luku- ja laskelmat. Dokumenttien rakenne etenee kronologisesti niin, että laskut käydään läpi putkien kokojärjestyksessä pienimmästä suurimpaan. Ensimmäisinä käsitellään yksittäiset putket ja kammiot, ja tämän jälkeen erilaiset yhdistetyt laskentatapaukset riippuen EN- tai ASME -dokumentista. Viimeisimpänä lasketaan päädyt.

Sivut saadaan tulostettua suoraan laskentaohjelmista ja jokainen dokumenttisivu on nimetty tarkasteltavan kohteen mukaan. Ensimmäisellä otsikkorivillä on ilmoitettu mistä laskentakohteesta on kysymys ja toisella otsikkorivillä täsmennetään kyseistä laskentatapauksista. Lisäksi hiekkalukon kammiot on numeroitu position mukaan, jolloin laskentatapauksen kohdistaminen on helpompaa ja epäselvyyksien syntyminen vähäisempää (kuvio 29). Esimerkiksi jos puhutaan oikeasta yläkammiosta, puhutaankin kammiosta 1.2, jolloin sekaannuksen vaaraa ei ole. Näin vältetään myös turhan monimutkaisilta ilmauksilta. Dokumenttisivuille on lisätty myös joitain laskentoja selventäviä huomiota, mikäli niille on tarvetta.

Item:	Wall tube 1 and floor tube 1 to headers 2.1 and 2.3
	Loopseal headers, adjacent nozzles: Pitch xx,x mm, xx°

KUVIO 29. Laskentatapauksen kohdennus

11.3.2 Mallidokumentin käyttäminen

Mallidokumentti toimii niin, että suunnittelija avaa ensin EN- tai ASME -pohjaisen hiekkalukon laskentadokumentin riippuen projektista. Lisäksi avataan laskentaohjelma, jolla laskentoja on tehty aikaisemminkin. Tämän jälkeen tarkastetaan projektin suunnitteluarvot ja valitaan Excel-pohjan välilehdeltä suunnitteluarvoihin sopiva paineraja. Laskentaohjelmaan kirjataan projektin numero ja -nimi, laskijan nimi, kohteen numero ja piirustuksen numero, mihin laskenta liittyy (kuvio 30). Otsikkokentät voi kopioida suoraan mallidokumentista. Seuraavaksi laskentaohjelmaan syötetään oikeat alkuparametrit (kuvio 31) ja laskuissa edetään mallidokumentin mukaisesti. Lopuksi tehdään kansilehti ja laskentapaketti tulostetaan tai tallennetaan.

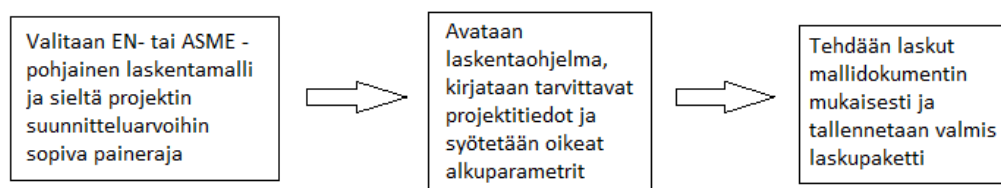
Project:	110xxx	Work no.	Cxxxxx
	Project name	Dwg.no	P00xxx

KUVIO 30. Projektitiedot

Design pressure	pd	14,90	M Pa
Static head	pst	0,00	M Pa
Design temperature	td	342	°C
Temperature allowance		20	°C

KUVIO 31. Suunnitteluparametrit

Mallidokumentti on asiakirja, jota hyödynnetään projektin tarpeiden mukaan. Laskentaohjelman ja mallidokumentin voi laittaa näytölle esimerkiksi rinnakkain ja valmiit laskennat tulostuvat automaattisesti erilliselle sivulle. Näin kaikki hiekkalukon laskentata-paukset tulee käytyä läpi ja dokumentista tulee johdonmukainen, jonka voi esittää suoraan Ilmoitetulle laitokselle. Lyhentyntä laskentaprosessia havainnollistaa kuvio 32.



KUVIO 32. Laskentaprosessin vaiheet

12 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli määrittää vakioitavalle hiekkalukko-komponentille EN -standardin ja ASME -koodin mukaiset putkimateriaalit ja -kokoluokat sekä hakea näille sopivat painerajat. Lisäksi tavoitteena oli tarkastella laskentadokumentaation laadinnan kehittämismahdollisuuksia. Työ painottui painerunkokomponenttien ja painelaitteiden erilaisten mitoittamistapojen tutkimiseen. Iteroimalla ja edellisiä projekteja tutkimalla sopivat määrittelyt olivat löydettävissä. Tästä eteenpäin hiekkalukon esisuunnitteluvaiheessa voidaan käyttää konfiguraattoria, joka helpottaa huomattavasti varsinaista projektityötä.

Painelaitelaskennassa EN -standardin mukainen lähestymistapa osoittautui hyvin seikkaperäiseksi, kun taas ASME -koodissa annettiin enemmän vapauksia. Mielenkiintoista oli, kuinka paljon eroavaisuuksia eurooppalaisessa ja amerikkalaisessa tavassa toteuttaa painelaitelaskentaa itse asiassa on. Molemmissa käytetään omia symboleita ja tapoja ilmaista laskentaan liittyviä kokonaisuuksia. Varsinkin ASME:ssä ”lakitekstityylinen” tapa viitata lukemattomiin eri kohtiin tekee tarkasteltavan asian ymmärtämisestä haastavaa.

Yksi suurimmista haasteista oli putkimateriaalien ja -kokoluokkien optimointi. Hiekkalukko ilman hiekkatulistinta on itsessään melko yksinkertainen komponentti, mutta useiden kymmenien eri laskentatapausten läpikäyminen iteroimalla osoittautui paljon aikaa vieväksi. Vaikka putkimateriaaleja- ja kokoja on standardisoitu aikaisemminkin ja esimerkiksi seinäputkien jako on vakioitu, muodostui lopullisista laskelmista suuri määrä eri kombinaatioita. Tulosten perusteella päädyttiin Valmetin tietokannasta löytyviin putkikokoihin ja aikaisemmin esitettyihin painerajoihin.

Vakiodokumentaation kehittämisessä valmiiseen mallidokumentti ratkaisuun päädyttiin melko nopeasti. Tähän vaikuttivat jo olemassa olevien laskentaohjelmien antamat tulokset, jotka olivat hyvin selkeitä. Suurempiin muutoksiin ei nähty tarvetta. Jatkoa ajatellen, voi vastaavia laskentapaketteja tehdä muihinkin kohteisiin, jolloin loppudokumentaation tekeminen on nopeampaa ja selkeämpää.

LÄHTEET

Alin, K. Chief Design Engineer. 2015. Painelaiteasiaa Servicelle: PED ja EN12952. Luento. Sisäinen koulutus, Valmet Technologies Oy 4.12.2015. Tampere.

Alin, K. Chief Design Engineer. 2015. Suunnittelu ASME:n mukaan: Kattilat ja putkistot. Sisäinen koulutus, Valmet Technologies Oy 20.10.2015. Tampere.

ASME Boiler and Pressure Vessel Committee. 2013. ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section I. Rules for construction of power boilers. Two Park Avenue. New York.

ASME Boiler and Pressure Vessel Committee. 2013. ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II. Materials. Part D, Properties (Metric). Two Park Avenue. New York.

Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J. & Salonen, P. 2014. 6. painos. Koneenosien suunnittelu. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Heino, T. Product Manager. 2016. Haastattelu. 15.1.2016. Haastattelija Merikoski, A. Valmet Technologies Oy. Tampere.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.

KnowEnergy. 2016. Höyrykattilan periaate. Luettu 22.1.2016.

http://www.knowenergy.net/suomi/monipoltt_kattilat/5_0_hoyrykatt_periaate/frame.htm

Salmi, T. & Virtanen, S. 2008. Materiaalien mekaniikka. Tampere: Pressus Oy.

Salmi, T. & Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampere: Pressus Oy.

Sarinko, K. 1999. Asiakaskohtaisesti muunneltavien tuotteiden massaräätälöinti, konfigurointi ja modulointi. Teknillinen korkeakoulu. Konetekniikan osasto. Diplomityö.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2012. SFS-EN 12952-3. Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 3: Paineenalaisten osien suunnittelu ja laskenta. Helsinki.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2011. SFS-EN 12952-5. Vesiputkikattilat ja niihin liittyvät laitteistot. Osa 5: Paineenalaisten osien valmistus. Helsinki.

Suomen standardoimisliitto SFS. 2014. SFS-EN 10216-2. Saumattomat painelaiteteräspanputket. Tekniset toimitusehdot. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräspanputket. Helsinki.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry. 2016. Standardien laadinta. Luettu 22.1.2016.

http://www.sfs.fi/standardien_laadinta

Turvatekniikan keskus. 2016. Painelaitteet. Luettu 22.1.2016.

<http://www.tukes.fi/fi/Toimialat/Painelaitteet/>

Turvatekniikan keskus. 2016. Tukes -opas: Painelaitteet. Luettu 7.1.2016.
http://www.tukes.fi/Tiedostot/painelaitteet/esitteet_ja_oppaat/painelaiteopas.pdf

Työterveyslaitos. 2011. Tuhkan sisältämät haitalliset kemialliset aineet ja mineraalit -
Altistuminen ja torjunta. Loppuraportti työsuojelurahastolle. Kuopio/ Oulu/ Helsinki.

Valmet Technologies Oy. 2015. About Us. Luettu 18.12.2015.
<http://www.valmet.com/about-us/>

Valmet Technologies Oy. 2015. Products. Luettu 18.12.2015.
<http://www.valmet.com/products/>

Valmet Technologies Oy. 2015. Media gallery. Luettu 18.12.2015.
<http://www.valmet.com/media/media-gallery/businesses/>

Valmet Technologies Oy. 2015. MyAcademy. Luettu 15.11.2015.
<https://myacademy.valmet.com/>

Valtanen, E. 2012. 19. painos. Tekniikan taulukkokirja. Mikkeli: Genesis-Kirjat Oy.

LIITTEET

Liite 1. Moduulien selitteet (Tukes: Painelaitteopas 2016)

Arviointimenettely (moduuli)		Kuvaus
A	Valmistuksen sisäinen tarkastus	Valmistaja laatii tekniset asiakirjat ja tekee loppuarvioinnin.
A1	Valmistuksen sisäinen tarkastus ja loppuarvioinnin valvonta	Valmistaja laatii tekniset asiakirjat ja tekee loppuarvioinnin, jota ilmoitettu laitos valvoo.
B	EY-tyyppitarkastus	Ilmoitettu laitos tarkastaa tyypin vaatimustenmukaisuuden.
B1	EY-suunnitelmatarkastus	Ilmoitettu laitos tarkastaa suunnitelman vaatimustenmukaisuuden.
C1	Tyyppimukaisuus	Valmistaja tekee loppuarvioinnin, jota ilmoitettu laitos valvoo.
D	Tuotannon laadunvarmistus	Valmistaja soveltaa valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.
D1	Tuotannon laadunvarmistus	Valmistaja laatii tekniset asiakirjat sekä soveltaa valmistuksessa testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.
E	Tuotteiden laadunvarmistus	Valmistaja soveltaa testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.
E1	Tuotteiden laadunvarmistus	Valmistaja laatii tekniset asiakirjat sekä soveltaa testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.
F	Tuotekohtainen todennus	Ilmoitettu laitos tekee tuotekohtaisen loppuarvioinnin.
G	Yksikkökohtainen EY-todennus	Ilmoitettu laitos tekee tuotteen suunnitelma- ja loppuarvioinnin.
H	Täydellinen laadunvarmistus	Valmistaja soveltaa suunnittelussa, valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos.
H1	Täydellinen laadunvarmistus ja suunnitelmatarkastus sekä loppuarvioinnin erityisvalvonta	Valmistaja soveltaa suunnittelussa, valmistuksessa, testauksessa ja loppuarvioinnissa laatujärjestelmää, jonka hyväksyy ja jonka noudattamista valvoo ilmoitettu laitos. Lisäksi ilmoitettu laitos tekee suunnitelmatarkastuksen ja valvoo loppuarviointia.

Liite 2. EN -standardin mukaiset materiaaliarvot (SFS-EN 10216-2: Saumattomat painelaiteteräsputket 2014)

1(2)

Taulukko 5 Venymisrajan $R_{p0,2}$ vähimmäisarvot korotetuissa lämpötiloissa

Teräslaji		Seinämän- paksuus mm	Venymisrajan $R_{p0,2}$ vähimmäisarvot MPa ^{a)} lämpötilassa °C											
Nimike	Numero- tunnus		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	
P195GH	1.0348	≤ 16	175	165	150	130	113	102	94	-	-	-	-	
P235GH	1.0345	≤ 60	198	187	170	150	132	120	112	108	-	-	-	
P265GH	1.0425	≤ 60	226	213	192	171	154	141	134	128	-	-	-	
20MnNb6	1.0471	≤ 60	312	292	264	241	219	200	186	174	-	-	-	
16Mo3	1.5415	≤ 60	243	237	224	205	173	159	156	150	146	-	-	
8MoB5-4	1.5450	≤ 16	368	368	368	368	368	368	368	-	-	-	-	
14MoV6-3	1.7715	≤ 60	282	276	267	241	225	216	209	203	200	197	-	
10CrMo5-5	1.7338	≤ 60	240	228	219	208	165	156	148	144	143	-	-	
13CrMo4-5	1.7335	≤ 60	264	253	245	236	192	182	174	168	166	-	-	
10CrMo9-10	1.7380	≤ 60	249	241	234	224	219	212	207	193	180	-	-	
11CrMo9-10	1.7383	≤ 60	323	312	304	296	289	280	275	257	239	-	-	
25CrMo4	1.7218	≤ 60	-	315	305	295	285	265	225	185	-	-	-	
20CrMoV13-5-5	1.7779	≤ 60	-	575	570	560	550	510	470	420	370	-	-	
15NiCuMoNb5-6-4	1.6368	≤ 80	422	412	402	392	382	373	343	304	-	-	-	
7CrWVMoNb9-6	1.8201	≤ 60	379	370	363	361	359	351	345	338	330	299	266	
7CrMoVTiB10-10	1.7378	≤ 50	397	383	373	366	359	352	345	336	324	301	248	
X11CrMo5+I	1.7362+I	≤ 100	156	150	148	147	145	142	137	129	116	-	-	
X11CrMo5+NT1	1.7362+NT1	≤ 100	245	237	230	223	216	206	196	181	167	-	-	
X11CrMo5+NT2	1.7362+NT2	≤ 100	366	350	334	332	309	299	289	280	265	-	-	
X11CrMo9-1+I	1.7386+I	≤ 60	187	186	178	177	175	171	164	153	142	120	-	
X11CrMo9-1+NT	1.7386+NT	≤ 60	363	348	334	330	326	322	316	311	290	235	-	
X10CrMoVNb9-1	1.4903	≤ 100	410	395	380	370	360	350	340	320	300	270	215	
X10CrWVMoVNb9-2	1.4901	≤ 100	420	412	405	400	392	382	372	360	340	300	248	
X11CrMoWVNb9-1-1	1.4905	≤ 100	412	401	390	383	376	367	356	342	319	287	231	
X20CrMoV11-1	1.4922	≤ 100	-	-	430	415	390	380	360	330	290	250		

a) 1 MPa = 1 N/mm².

(jatkuu)

2 (2)

Taulukko A.1 Virumismurtorajan arvot

Teräslaji		Lämpötila °C	Virumismurtorajan arvot (MPa) ^{a), b), c), d)}			
Nimike	Numerotunnus		10 000 h	100 000 h	200 000 h	250 000 h
P235GH P265GH	1.0345 1.0425	400	182	141	128	122
		410	166	128	115	109
		420	151	114	102	97
		430	138	100	89	86
		440	125	88	77	74
		450	112	77	66	64
		460	100	66	56	54
		470	88	56	46	44
		480	77	47	33	30
		490	67	39	26	-
		500	58	32	24	-
20MnNb6	1.0471	400	243	179	157*	150*
		410	221	157	135*	128*
		420	200	136	115*	108*
		430	180	117	97*	91*
		440	161	100	82*	77*
		450	143	85	70*	66*
		460	126	73	60*	56*
		470	110	63	52*	48*
		480	96	55	44*	41*
		490	84	47	37*	32*
		500	74	41	-	-
16Mo3	1.5415	450	298	236	218	210
		460	273	205	188	179
		470	247	176	158	148
		480	221	149	129	122
		490	196	124	105	98
		500	171	102	84	78
		510	148	83	67	63
		520	125	65	53	50
		530	104	51	42	38
		540	84	40	34	-
		550	64	32	25	-
14MoV6-3	1.7715	450	377	305	282	275
		460	349	276	255	247
		470	324	249	226	220
		480	298	224	202	195
		490	274	200	179	171
		500	249	177	158	150
		510	225	155	136	129
		520	203	135	117	110
		530	181	117	101	95
		540	162	102	86	82
		550	143	87	74	70
		560	126	75	63	59
		570	112	65	54	50
		580	97	58	47	43
590	85	48	40	37		
600	74	41	34	32		
15NiCuMoNb5-6-4	1.6368	400	402	373		
		410	385	349		
		420	368	325		
		430	348	300		
		440	328	273		
		450	304	245		
		460	274	210		
		470	242	175		
		480	212	139		
		490	179	104		
500	147	69				

Liite 3. ASME -koodin mukaiset materiaaliarvot (ASME Boiler & Pressure Vessel Code: Section II Materials Part D 2013)

1 (2)

Carbon steel		Plate	SA-515	60					K02401	...	...			1	1
Carbon steel		Plate	SA-516	60					K02100	...	...			1	1
Carbon steel		Wld. pipe	SA-671	CB60					K02401	...	...			1	1
Carbon steel		Wld. pipe	SA-671	CC60					K02100	...	...			1	1
Carbon steel		Wld. pipe	SA-671	CE60					K02402	...	...			1	1
415	220	538		371		538	343	CS-2			G10, S1, T2				
415	220	454		371		538	343	CS-2			G10, S1, T2				
415	220	NP		371		NP	NP	CS-2			S6, W10, W12				
415	220	NP		371		NP	NP	CS-2			S6, W10, W12				
415	220	NP		371		NP	NP	CS-2			S6, W10, W12				
118	118	138	118	118	118	118	115	112	108	104	88.9	75.3	62.7	45.5	
118	118	118	118	118	118	118	115	112	108	104	88.9	75.3	62.7	45.5	
118	118	118	118	118	118	118	115	112	108	104	...	...	...	...
118	118	118	118	118	118	118	115	112	108	104	...	...	...	...
118	118	118	118	118	118	118	115	112	108	104	...	...	...	...
31.6	21.9	12.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31.6	21.9	12.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...
...
...
Carbon steel		Smls. pipe	SA-106	B					K03006	...	...			1	1
Carbon steel		Wld. pipe	SA-135	B					...	...	...			1	1
Carbon steel		Smls. & wld. fittings	SA-234	WPB					K03006	...	...			1	1
415	240	538		371		538	343	CS-2			G10, S1, T1				
415	240	NP		NP		482	343	CS-2			G24, T1, W6				
415	240	538		371		538	343	CS-2			G10, S1, T1				
118	118	118	118	118	118	118	118	118	117	105	88.9	75.3	62.7	45.5	
101	101	101	101	101	101	101	101	101	99.7	89.7	75.9	64.1	53.3	38.6	
118	118	118	118	118	118	118	118	118	117	105	88.9	75.3	62.7	45.5	
31.6	21.9	12.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
26.8	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31.6	21.9	12.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
Carbon steel		Smls. tube	SA-210	A-1					K02707	...	...			1	1
Carbon steel		Smls. tube	SA-556	B2					K02707	...	...			1	1
Carbon steel		Wld. tube	SA-557	B2					K03007	...	...			1	1
Carbon steel		Plate, bar	SA/CSA-G40.21	38W					...	...	...			1	1
415	255	538		371		538	343	CS-2			G10, S1, T1				
415	255	NP		NP		538	343	CS-2			G10, T1				
415	255	NP		NP		538	343	CS-2			G24, T1, W6				
415	260	NP		NP		343	343	CS-2			...				

(jatkuu)

