

Irina Plekh

**ASME-STANDARDIN MUKAISTEN PUTKISTOKOMPONENTTIEN
LUJUUSLASKENTAPOHJAN LAATIMINEN EXCEL-TAULUKKO-
LASKENTA-OHJELMALLA**

**ASME-STANDARDIN MUKAISTEN PUTKISTOKOMPONENTTIEN
LUJUUSLASKENTAPOHJAN LAATIMINEN EXCEL-TAULUKKO-
LASKENTA-OHJELMALLA**

Irina Plekh
Opinnäytetyö
Kevät 2020
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikka

Tekijä: Irina Plekh

Opinnäytetyön nimi: ASME-standardin mukaisten putkistokomponenttien lujuuslaskentapohjan laatiminen Excel-taulukkolaskentaohjelmalla

Työn ohjaajat: Timo Kiviahde ja Juha Kortessalo

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2020 Sivumäärä: 30 + 4 liitettä

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Excel-pohjainen laskentasovellus, jolla olisi mahdollista mitoittaa putkistoa vastaamaan ASME B31.1 Power Piping -standardia. Mitoituksessa putkistokomponenteille määritetään minimi materiaali-paksuus käyttöolosuhteiden mukaan.

Työn toimeksiantajana toimi Oukotek Oy, jonka yksi toimialoista on putkistosuunnittelu. Yrityksessä käytetään laajasti standardia ASME B31.1 Power Piping, ja sen mukaan suunnitellaan esimerkiksi voima- ja soodakattilaputkistot. Standardissa on esitetty lujuuslaskentamenetelmät eri putkikomponenteille ja laitteille. Putkiston turvallinen käyttö edellyttää sen materiaalin kestävyyttä kaikissa mahdollisissa käyttöolosuhteissa. Työssä laaditulla laskurilla voidaan arvioida tietyn komponentin kestävyyttä, jos komponentin koko ja materiaali ovat tiedossa. Tuloksena on standardin mukaan vaadittu minimiseinäpaksuus eri putkikomponenteille (suora putki, putkitaivutus, haaraliitos) tai minimi putkipäädyn paksuus.

Työn sisältö rajattiin yllä mainittuihin putkistokomponentteihin ja tiettyyn määrään materiaaleja, jotka ovat tärkeitä työn tilaajan kannalta. Valituille materiaaleille laskuriin on koottu lujuusominaisuudet, ja ohjelma hakee tarvittavat arvot automaattisesti syötettyjen lähtöarvojen perusteella. Materiaalitalukkoa on mahdollista tarvittaessa myös tulevaisuudessa laajentaa. Eri komponenteille laskentataulukot sijoitettiin eri Excel-tiedoston välilehtiin. Käyttäjän on syötettävä alkuarvot, kuten laskentapaine, laskentalämpötila, komponentin materiaali, sekä putkien koot ja ehdotettu seinämepaksuus. Ohjelma laskee standardin mukaan vaaditun materiaali-paksuuden ja varmistaa ehdotetun paksuuden riittävyyden. Tämän lisäksi arvioidaan haaroitusten liitoskohdan lisävahvistuksen tarvetta ja lasketaan vaadittu hitsausauman minimipaksuus. Myös putkipäädyle lasketaan sallitun minimipaksuuden arvo.

Asiasanat: ASME B31.1, BPVC Section I, putkistosuunnittelu, lujuuslaskenta

SISÄLLYS

| | |
|---|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| SISÄLLYS | 4 |
| 1 JOHDANTO | 5 |
| 2 TEOLLISUUSPUTKISTOIHIN LIITTYVÄT ASME-STANDARDIT | 7 |
| 3 PUTKIKOMPONENTTIEN MITOITUS ASME B31.1 -STANDARDISSA | 10 |
| 3.1 Materiaalit | 10 |
| 3.2 Pienin vaadittu seinämäpaksuus, suoraputki | 11 |
| 3.2.1 Laskentapaine ja -lämpötila | 13 |
| 3.2.2 Suurin sallittu jännitys | 14 |
| 3.2.3 Hitsausliitoksen lujuuskerroin | 15 |
| 3.2.4 Kerroin y | 16 |
| 3.2.5 Toleranssit ja paksuuslisät | 16 |
| 3.3 Pienin vaadittu seinämäpaksuus, taivutus | 17 |
| 3.4 Pienin vaadittu seinämäpaksuus, aukot ja haaroitukset | 18 |
| 3.4.1 Haaroituskohdassa vaadittu vahvistuspinta-ala | 19 |
| 3.4.2 Käytössä oleva vahvistuspinta-ala | 20 |
| 3.5 Pienin vaadittu seinämäpaksuus, kartiot | 22 |
| 3.6 Pienin vaadittu päädyn paksuus | 22 |
| 4 EXCEL-LASKENTAPOHJAN LUOMINEN | 25 |
| 5 YHTEENVETO | 28 |
| LÄHTEET | 30 |

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on ASME-standardin mukaisten putkistokomponenttien lujuuslaskentasovelluksen luominen Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Opinnäytetyön toimeksiantaja on vuonna 2016 perustettu suomalainen konsultointi- ja suunnitteluyritys Oukotek Oy. Yrityksen toimialat ovat automaatio-, sähkö- ja putkistosuunnittelu. Putkistosuunnittelupalveluun kuuluvat esi- ja toteutussuunnittelu voimalaitos-, kattilalaitos- ja prosessiteollisuuden putkistoihin. Oukotek Oy tarjoaa putkistosuunnittelupalvelua sekä kotimaisille että ulkomaisille energia-alan yrityksille. (1.)

Laitoksen suunnittelussa käytetään erilaisia kansainvälisiä standardeja ja koodoja. Standardi on joukko komponenttien tai laitteiden turvallisuus- ja tehokkuusvaatimuksia ja ohjeita suunnittelijoille, valmistajille ja käyttäjille. Standardit edistävät turvallisuutta ja tehokkuutta kaikilla tekniikan aloilla, koska ne takaavat valmistajan, suunnittelijan ja käyttäjän yhteisymmärrystä. (2.)

Maailmassa on monta eri standardia. Esimerkiksi Suomessa käytetään eniten SFS-EN-standardeja, jotka pätevät koko Euroopassa. ASME-standardeja käytetään laajasti ympäri maailmaa. ASME (*eng.* American Society of Mechanical Engineers) on vuonna 1880 perustettu voittoa tavoittelematon järjestö, ja sillä oli alun perin tavoitteena höyrykattiloiden käytön turvallisuuden kehittäminen (3). Nykyään ASME on iso monialainen ja globaali standardointiorganisaatio, tutkimus- ja kehitysorganisaatio, asianajajaorganisaatio ja koulutuksen tarjoaja. ASME-standardeja käytetään yli 140 maassa.

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana on Oulussa toimiva Oukotek Oy, joka tarjoaa suunnittelupalveluja sekä EN- että ASME-standardien mukaisille putkistoille. Suunnitteluprosessi koostuu monista eri vaiheista ja yksi niistä on putkistokomponenttien mitoitus kestämään laitoksen toiminnassa syntyviä kuormia. Kun voimalaitoksen toimintaolosuhteet ja tietyn putken koko on määritetty, jokaiselle komponentille on suoritettava lujuuslaskenta. Kestävyyteen vaikuttavat ensisijaisesti komponentin materiaali, valmistustapa ja koko.

Tässä opinnäytetyössä käytetään putkistosuunnittelustandardissa ASME B31.1 Power Piping esitettyä pienimmän vaaditun materiaaliipaksuuden laskentamennettä. Työn tuloksena on laadittu Excel-pohjainen laskuri, jolla voidaan suorittaa standardin mukaista laskentaa eri putkikomponenteille.

2 TEOLLISUUSPUTKISTOIHIN LIITTYVÄT ASME-STANDARDIT

American Society of Mechanical Engineers eli ASME on voittoa tavoittelematon yhdysvaltalainen standardisointijärjestö ja yksi pisimpään toiminut standardeja tuottava organisaatio. Sen päätavoitteena on laitteiden valmistus- ja käyttöturvallisuuden parantaminen. Kattavat höyrykattiloiden valmistus- ja käytösäädökset puuttuivat ja lukuisten höyrykattiloilla sattuneiden onnettomuuksien seurauksena ASME-järjestö perustettiin vuonna 1880. ASME:n toiminta johti ensimmäisen Boiler & Pressure Vessel Code:n (BPVC) julkaisuun vuonna 1915. Se sisällytettiin myöhemmin useimpien Yhdysvaltojen osavaltioiden ja Kanadan maakuntien lakeihin. Nykyään ASME:lla on yli 600 koodia ja standardia. (3)

Boiler & Pressure Vessel Code (BPVC) on kokoelma standardeja, jotka käsittävät suunnittelu-, valmistus- ja käyttövaatimukset eri tyyppisille kattiloille ja paineastioille. BPVC-standardin kokoelma päivitetään kahden vuoden välein. BPVC on jaettu erillisiin osiin, joista jokainen kattaa oman osa-alueensa, kuten voimakattilat, lämmityskattilat, paineastiat, ydintekniset laitteet, kuljetussäiliöt, valmistus- ja testausprosessit ja materiaalit. (4.)

Standardin ensimmäinen osa (BPVC, Section I "Rules for Construction of Power Boilers") sisältää valmistusohjeita ja turvallisuuskriteerit höyry- ja vesikattiloille, tulistimille, ekonomaiserille ja polttokammioille. Säännöt koskevat höyrykattiloita, joiden veden tai muun aineen höyryn paine on vähintään 100 kPa (g) sekä korkean lämpötilan vesikattiloita, joille käyttöpaineeksi on määritetty vähintään 1,1 MPa (g) ja/tai käyttölämpötila ylittää 120 °C. (4)

Painelaitekokonaisuus jaetaan standardissa BPVC kolmeen ryhmään, joille vaatimukset määritetään erikseen:

- boiler proper
- boiler external piping
- nonboiler external piping.

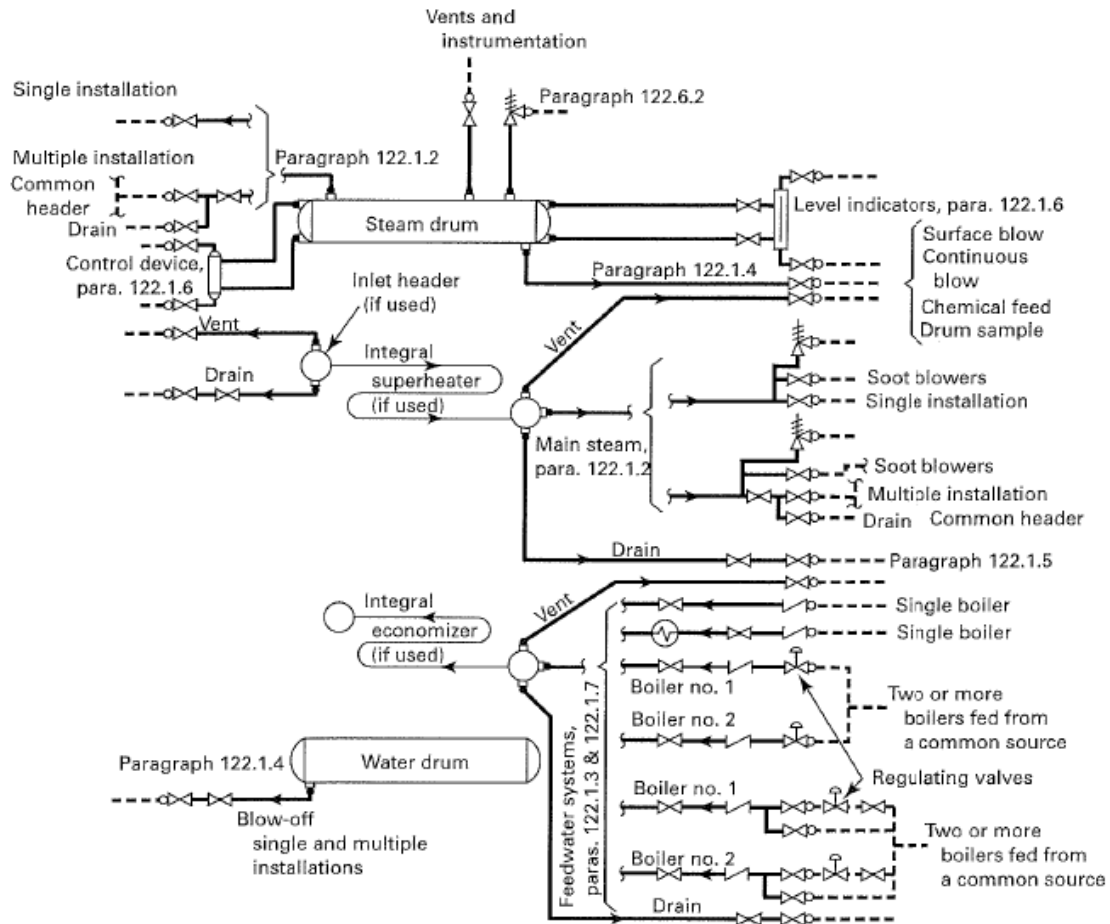
Kaikki BPVC, Section I:n säännöt koskevat boiler proper- ja boiler external piping -ryhmiä. Ryhmään boiler proper kuuluvat voimakattiloiden lisäksi myös tulistimet ja ekonomaiserit, jotka on liitetty suoraan kattilaan ilman väliventtiiliä tai ovat erillisenä laitteena. Ryhmän painelaitteiden suunnittelusäännöt on esitetty standardissa BPVC Section I. Kattilaan liitetyt putkistot käsitellään eri kokonaisuutena (boiler external piping), jolle asetetut suunnittelu-, valmistus- ja käyttövaatimukset on koottu erilliseen standardiin ASME B31.1 Power Piping. Tähän ryhmään kuuluva putkisto alkaa paineastian jälkeen ensimmäisessä liitoskohdassa ja päättyy seuraavaan venttiiliin. Liitoskohdat (hitsaussauma, laippa tai kierreluotto) ja edellä mainitut venttiilit kuuluvat myös boiler external piping -kokonaisuuteen. Venttiilin jälkeen alkava putkisto kuuluu ryhmään nonboiler external piping.

Tämä jaottelu on tärkeää sopivan suunnittelustandardin valinnan kannalta. Valinnan helpottamiseksi standardeissa BPVC ja B31.1 on esitetty eri paineastioille ja kattiloille kaaviot, jotka havainnollistavat, kuinka putkistokomponentit standardin mukaisesti ryhmitellään. Kuvassa 1 on esitetty kaavio vesiputkikattiloille B31.1-standardin soveltamisesta. Eri ryhmiin kuuluvat putket ovat merkitty erityyppisillä viivoilla, kuvassa näkyy myös putkistojen nimet ja niihin liittyvät standardin kohdat. Eri komponenttien mitoitus varten on määritettävä, mihin kokonaisuuteen (boiler proper, boiler external piping tai nonboiler external piping) putki kuuluu ja mitä standardia tulee käyttää suunnittelussa.

Kattilan tai paineastian osien (boiler proper) on täytettävä kaikki BPVC Section I -standardin vaatimukset, myös mitoitus suoritetaan standardissa esitetyillä laskentamenetelmillä. Kattilan ulkopuolisten putkien (boiler external piping) suunnittelun on oltava B31.1 standardin mukaista, mutta putkiston osien on läpäistävä BPVC Section I -standardissa vaaditut laatutarkastukset, niissä on oltava leimat ja dokumentaatio täytyy olla saatavilla. Poikkeuksena ovat venttiilit (lukuun ottamatta varoventtiiliä), joille mainittuja laatutarkastuksia ei vaadita. Pienten putkien (putkikoko alle DN15) hitsausliitoksille ei vaadita BPVC, Section I -standardin mu-

kaista tarkastusta eikä leimoja. Kaikki muut putkisto-osat (nonboiler external piping -ryhmään kuuluva putkisto) suunnitellaan pelkästään B31.1 -standardin sääntöjä noudattaen.

Figure 100.1.2-3 Code Jurisdictional Limits for Piping — Drum-Type Boilers



Administrative Jurisdiction and Technical Responsibility

- Boiler Proper — The ASME Boiler and Pressure Vessel Code (ASME BPVC) has total administrative jurisdiction and technical responsibility. Refer to ASME BPVC, Section I, Preamble.
- Boiler External Piping and Joint (BEP) — The ASME BPVC has total administrative jurisdiction (mandatory certification by stamping the Certification Mark with the appropriate Designator, ASME Data Forms, and Authorized Inspection) of BEP. The ASME Section Committee B31.1 has been assigned technical responsibility. Refer to ASME BPVC, Section I, Preamble and ASME B31.1 Scope, para. 100.1.2(a). Applicable ASME B31.1 Editions and Addenda are referenced in ASME BPVC, Section I, PG-58.3.
- - - Nonboiler External Piping and Joint (NBEP) — The ASME Code Committee for Pressure Piping, B31, has total administrative jurisdiction and technical responsibility.

KUVA 1. Putkiston jaottelu suunnittelussa käytettävän standardin mukaan (5)

3 PUTKIKOMPONENTTIEN MITOITUS ASME B31.1 -STANDARDISSA

ASME B31.1 Power Piping -standardi on yksi ASME B31 Pressure Piping -standardin monista eri osista. Standardin ohjeet koskevat putkistokokonaisuuksia, joita on mm. voimalaitoksissa, teollisuustuotantolaitoksissa, maalämpö-, kaukolämpö- ja kaukojäähdytysjärjestelmissä. Standardissa on esitetty suunnittelu-, materiaali-, valmistus-, testaus-, käyttö- ja huoltovaatimukset putkistosysteemille. (5.)

ASME B31.1 standardin säädökset koskevat putkistoja, jotka kuuluvat boiler external piping ja nonboiler external piping -putkistoryhmiin. Standardi soveltuu mm. vesi-, höyry-, öljy-, kaasu- tai ilmaputkistoille. Standardin B31.1 määritelmän mukaan putkistoon kuuluu putket, laipat, ruuvit, tiivisteet, venttiilit, paineenalennuslaitteet ja muiden putkikomponenttien paineen alaiset osat, jotka ovat valmistettu joko B31.1:n taulukossa 126.1-1 lueteltujen standardien ja spesifikaatioiden tai muun luotettavan suunnitelman mukaan.

Standardissa B31.1 esitetyt suunnitteluohjeet ovat laajoja, ja ne kattavat mm. staattiset ja dynaamiset kuormat, ympäristön vaikutukset, pitkittäiskuormien analysoinnin sekä sisäisen ja ulkoisen paineen vaikutuksen putkiin. Tässä työssä tutkitaan vain sisäisen staattisen paineen alaisten putkiosien mitoitusta.

3.1 Materiaalit

Taulukko 126.1-1 sisältää eri putkistokomponenttien spesifikaatiot, joissa materiaalille, koolle, käyttölämpötilalle ja -paineelle määritetään teknilliset vaatimukset käyttötarkoituksen mukaan. Esimerkiksi standardin spesifikaatio A106/A106M "Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service" liittyy ryhmään "Carbon Steel. Seamless pipes". Spesifikaatiossa kuvataan saumattomat hiiliteräsputket, jotka on suunniteltu toimimaan korkeassa lämpötilassa mm. voimalaitoksissa, öljyjalostamoissa ja erilaisissa kattiloissa. Spesifikaatio kattaa putket,

joiden koot ovat DN 6 ... DN 1200. Dokumentissa määritetään tuotteiden valmistus- ja lämpökäsittelymenetelmät, valmistustoleranssit ja vaaditut testaukset. Spesifikaatioon kuuluu kolme materiaalilajia (grades), joille on annettu koostumus ja lujuusominaisuudet. (6.)

Standardissa B31.1 lujuusominaisuudet kaikille standardimateriaalille on koottu liitteen A (Mandatory Appendix A) taulukoihin A-1 ... A-10. Materiaalit on ryhmitelty koostumuksen mukaan, esimerkiksi hiiliteräkset on koottu taulukkoon A-1 ja ruostumattomat teräkset on esitetty taulukossa A-3. Taulukot sisältävät putkikomponenttien mitoituksen kannalta tärkeimmät tiedot: tietylle materiaalille sallittu maksimi suunnittelujännitys eri lämpötiloissa. Taulukon A-1 "Carbon Steels" alkuosa on esitetty kuvassa 2. Turvallisuusvaatimusten täytyminen edellyttää putkiston jokaisen osan kestävyyttä käyttöolosuhteissa. Tämä tarkoittaa sitä, että laskentalämpötilassa ja -paineessa putkimateriaalissa syntyvä jännitys ei saa ylittää liitteen A taulukoissa annettua arvoa. Tämä kriteeri täyttyy, jos putkiosassa seinämämateriaalin paksuus vastaa standardin B31.1 vaatimuksia eli se ylittää lasketun minimiarvon

3.2 Pienin vaadittu seinämäpaksuus, suoraputki

Pienemmän vaaditun paksuuden määrittelymenetelmä sisäisen paineen alaisille putkikomponentille on esitetty standardissa B31.1 kappaleessa 104 Pressure Design of Components. Mitoitusohjeet on annettu suorille putkille, taivutuksille, haaroituksille, päädyille, laipoille ja suuttimille. Tässä opinnäytetyössä laipat rajattiin pois.

Sisäisen paineen alaisen suoran putken pienin vaadittu materiaalipaksuuden laskentakaavat on esitetty standardissa B31.1 (kaavat 1 ja 2).

$$t_m = \frac{PD_o}{2(SEW+Py)} + A \quad \text{KAAVA 1}$$

$$t_m = \frac{Pd+2SEWA+2yPA}{2(SEW+Py-P)} \quad \text{KAAVA 2}$$

| Spec. No. | Grade | Type or Class | Nominal Composition | P-No. | Notes | Specified Minimum Tensile, ksi | Specified Minimum Yield, ksi | E or F |
|-------------------------------|-------|---------------|---------------------|-------|-----------|--------------------------------|------------------------------|--------|
| Seamless Pipe and Tube | | | | | | | | |
| A53 | A | S | C | 1 | (2) | 48 | 30 | 1.00 |
| | B | S | C-Mn | 1 | (2) | 60 | 35 | 1.00 |
| A106 | A | ... | C-Si | 1 | (2) | 48 | 30 | 1.00 |
| | B | ... | C-Si | 1 | (2) | 60 | 35 | 1.00 |
| | C | ... | C-Si | 1 | (2) | 70 | 40 | 1.00 |
| A179 | ... | ... | C | 1 | (1)(2)(5) | (47) | 26 | 1.00 |
| A192 | ... | ... | C-Si | 1 | (2)(5) | (47) | 26 | 1.00 |

a) materiaalien ominaisuudet

| Maximum Allowable Stress Values in Tension, ksi, for Metal Temperature, °F, Not Exceeding | | | | | | | | | | | Spec. No. |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------------------------------|
| 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 650 | 700 | 750 | 800 | Grade | |
| | | | | | | | | | | | Seamless Pipe and Tube |
| 13.7 | 13.7 | 13.7 | 13.7 | 13.7 | 13.7 | 13.7 | 12.5 | 10.7 | 9.0 | A | A53 |
| 17.1 | 17.1 | 17.1 | 17.1 | 17.1 | 17.1 | 17.1 | 15.6 | 13.0 | 10.8 | B | |
| 13.7 | 13.7 | 13.7 | 13.7 | 13.7 | 13.7 | 13.7 | 12.5 | 10.7 | 9.3 | A | A106 |
| 17.1 | 17.1 | 17.1 | 17.1 | 17.1 | 17.1 | 17.1 | 15.6 | 13.0 | 10.8 | B | |
| 20.0 | 20.0 | 20.0 | 20.0 | 20.0 | 20.0 | 19.8 | 18.3 | 14.8 | 12.0 | C | |
| 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.3 | 12.8 | 12.4 | 10.7 | 9.2 | ... | A179 |
| 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.3 | 12.8 | 12.4 | 10.7 | 9.0 | ... | A192 |

b) maksimi sisäisestä paineesta johtuva sallittu jännitys

KUVA 2. Standardin B31.1 taulukko A-1 "Carbon Steels" (5)

missä

t_m on vaadittu minimi seinämepaksuus (mm),

P on sisäinen laskentapaine (MPa (g)),

D_o on putken ulkohalkaisija (mm),

d on putken maksimi sisähalkaisija valmistustoleranssi huomioon ottaen (mm),

SE on putkimateriaalin tietyssä laskentalämpötilassa sallittu, sisäisestä paineesta johtuva, maksimi jännitys (MPa(g));

W on hitsausliitoksen lujuuskerroin,

y on taulukoitu kerroin,

A on paksuuslisien summa (mm).

Laskelmissa jompikumpi kaavoista 1 ja 2 valitaan sen mukaan, mikä arvo on mitoituksessa lähtöarvona: ulkohalkaisija tai sisähalkaisija. Pienin vaadittu seinämäpaksuus lasketaan tietylle putkelle, kun sen koko, materiaali ja muut laskentaparametrit ovat tiedossa. Kaavoilla 1 tai 2 laskettuun paksuuteen lisätään valmistustoleranssi ja tilatun putken seinämäpaksuuden on oltava seuraava suurempi arvo standardin ASME B36.10M taulukoista. Valmistustoleranssi on putken tai komponentin valmistusmenetelmän epätarkkuus, ja sen arvo löytyy useimmiten komponentin spesifikaatiosta.

3.2.1 Laskentapaine ja -lämpötila

Paineputkiston mitoittaminen on suoritettava siten, että se kestää suurimmat mahdolliset siihen kohdistuvat käytönaikaiset kuormitukset huomioon ottaen paine, lämpötila ja muut mahdolliset rasitukset. Haastavin tilanne on se, joka johtaa suurimpaan vaadittuun putken seinämän paksuuteen.

Pienin vaadittu seinämäpaksuus lasketaan kaavoilla 1 tai 2 tietyissä laskentapaineissa ja laskentalämpötilassa. Laskentapaineen määrittämiseen vaikuttavat eri tekijät, ja se ei saa olla pienempi kuin suurin putkisysteemissä jatkuvasti esiintyvä käyttöpaine (MSOP, Maximum Sustained operating Pressure). MSOP valitaan niin, että putkisto voi toimia jatkuvasti kaikissa odotettavissa olevissa olosuhteissa ilman varolaitteiden operointia.

Standardissa on esitetty laskentapaineen ja -lämpötilan määrittelyohjeet muutamalle eri putkistokokonaisuudelle. Esimerkiksi höyryputkiston laskentapaineen määrittämiseen vaikuttaa putkien sijainti systeemissä ja kattilan tai tulistimen varoventtiilien aukeamisarvot. Laskentapaineen minimiarvo suoraan höyrykattilaan liitettyssä putkistossa on kattilan varoventtiilien pienin aukeamispaine. Tulistimen poistoputkille laskentapaineeksi valitaan joko tulistimen varoventtiilien pienin toiminta-arvo tai 85 % kattilan laskentapaineen arvosta sen mukaan, kumpi arvo on suurempi. Paineastian jälkeen ensimmäisen sulkuventtiilin ja seuraavan venttiilin välillä sijaitsevalle putkelle laskentapaineen minimiarvo on joko tämän putkiston MSOP tai 85 % kattilan laskentapaineesta sen mukaan, kumpi arvo on suurempi.

Kaikissa tapauksissa höyryputkiston laskentapaine ei kuitenkin saa olla pienempi kuin 700 kPa (g).

Laskentalämpötilan on oltava metallin kaikissa odotettavissa olevissa olosuhteissa maksimilämpötila, joka on yleensä putkessa liikkuvan aineen suurin odotettavissa oleva lämpötila. Standardissa B31.1 käsiteltävät putkistot sijaitsevat lähellä kattiloita ja polttokammioita. Niissä aina on pieni lämpötilatoleranssi, jonka takia todellinen maksimi lähtölämpötila voi erota nimellisarvosta ja olla sitä suurempi. Kattilan valmistajan ilmoittama lämpötilatoleranssi on otettava huomioon laskentalämpötilan määrittämisessä.

3.2.2 Suurin sallittu jännitys

Kaavoissa 1 ja 2 esiintyvä suure SE kuvaa putkimateriaalille sallittua sisäisestä paineesta johtuvaa maksimijännitystä. Tämä parametri on taulukoitu standardissa B31.1 liitteessä A (Mandatory Appendix A) taulukoissa A-1 ... A-10. Tässä S on itse jännitys, lämpötilasta riippuva materiaalin ominaisuus, ja E on hitsausliitoksen kestävyyskerroin. Parametri E on käytettävä standardin mukaan suora- saumaisille putkille ja kierrehitsatuille putkille, ja sen arvo riippuu hitsausmenetelmästä. Kerroin E esiintyy liitteen A taulukoissa erikseen, mutta taulukkojen jännitysarvot sisältävät jo tämän parametrin. Saumattomille putkille $E = 1$. Kun kyseessä on valuosat, paitsi harmaasta raudasta valmistetut komponentit, on liitoksen kestävyyskerroimen E sijaan käytettävä valulaatukerrointa F . Kerroin F sisältyy valurauta ja -teräsmateriaalien jännitysarvoihin.

Standardin B31.1 liitteessä A materiaalit on lueteltu spesifikaation nimen ja materiaalityypin mukaan. Materiaalin sallittu maksimijännitys määriteltä eri lämpötiloille 100 °F (38 °C) alkaen. Suurin lämpötila, jolle arvo on annettu, on suurin sallittu suunnittelulämpötila tietylle materiaalille. Jos laskentalämpötila, jolle jännitys on määritettävä, jää taulukon lämpötilojen väliin, jännitysarvo määritetään lineaarisesta interpoloinnista käyttäen.

3.2.3 Hitsausliitoksen lujuuskerroin

Pienimmän sallitun seinämäpaksuuden määrittämisessä on otettava huomioon, että korotetuissa lämpötiloissa pitkittäin tai spiraalihitsatussa putkessa hitsaus-
sauman virumismurtolujuus voi olla pienempi kuin perusmateriaalissa. Taulu-
kosta saatu sallitun jännityksen maksimiarvo SE (tai SF) kerrotaan hitsausliitok-
sen lujuuskertoimella W . Virumisalueen ulkopuolella toimiville hitsatuille putkille
 $E = 1$. Jos toimintaolosuhteet vaativat korkeaa laskentalämpötilaa, jolloin virumis-
vaara kasvaa, hitsatun putken W -arvo on tarkistettava standardin B31.1 taulu-
kosta 102.4.7-1 (kuva 3). Taulukko sisältää W -arvoja eri materiaaliryhmille, jotka
on kuvattu taulukon kommenteissa. Materiaaliryhmälle on määritetty mm. siihen
kuuluvat materiaalit, materiaalien käyttöön virumisalueella liittyviä vaatimuksia
(esim. lämpökäsittely) sekä vaatimukset hitsausmateriaalille.

Jos putkikomponentin materiaali ei kuulu mihinkään taulukon ryhmään, sen
käyttö virumisalueella on kielletty. Virumisalueen raja (pelkästään kertoimen W
määrittelyä varten) on lämpötila, jolle viimeinen ei-kursivoitu jännitysarvo (SE/SF)
on ilmoitettu standardin taulukoissa A-1...A-8. Hiiliteräkset ovat poikkeuksena,
josta on kerrottu taulukon 102.4.7-1 kommenteissa. Hiiliteräksillä hitsausliitoksen
lujuuskerrointa ei tarvitse ottaa huomioon ja kaavoilla 1 ja 2 W -arvona käytetään 1.

Table 102.4.7-1 Weld Strength Reduction Factors to Be Applied When Calculating the Minimum Wall Thickness or Allowable Design Pressure of Components Fabricated With a Longitudinal Seam Fusion Weld

| Steel Group | Weld Strength Reduction Factor for Temperature, °F (°C) [Notes (1)–(7)] | | | | | | | | | | |
|--|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 700 (371) | 750 (399) | 800 (427) | 850 (454) | 900 (482) | 950 (510) | 1,000 (538) | 1,050 (566) | 1,100 (593) | 1,150 (621) | 1,200 (649) |
| CrMo [Notes (8), (9), (10)] | ... | ... | 1.00 | 0.95 | 0.91 | 0.86 | 0.82 | 0.77 | 0.73 | 0.68 | 0.64 |
| CSEF (N+T) [Notes (8), (11), (12)] | ... | ... | ... | ... | ... | 1.00 | 0.95 | 0.91 | 0.86 | 0.82 | 0.77 |
| CSEF (Sub Crit) [Notes (8), (13)] | ... | ... | ... | ... | 1.00 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 |
| Austenitic stainless (incl. 800H & 800HT) [Notes (14), (15)] | ... | ... | ... | ... | ... | 1.00 | 0.95 | 0.91 | 0.86 | 0.82 | 0.77 |
| Autogenously welded austenitic stainless [Note (16)] | ... | ... | ... | ... | ... | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

KUVA 3. Hitsausliitoksen lujuuskertoimen W arvot (5)

3.2.4 Kerroin y

Kerroin y on kaavoissa 1 ja 2 parametri, joka oli aikanaan standardia laadittaessa ainoastaan luku 0,4. Se muodostui kaavoja johtamisessa, mutta myöhemmin todettiin, että korkeissa lämpötiloissa (yli 900 °F) on järkevää käyttää suurempia arvoja. Tällöin standardin kaavoihin tuli suure y. Sen arvot on esitetty standardin B31.1 taulukossa 104. 1. (kuva 4), ja ne perustuvat lukuisiin testeihin. Korkeammat y-arvot johtavat pienempään putken seinämäpaksuuteen arvoon kuin 0,4. Näin olleen putkien massa laskee ja putkien kyky vastaanottaa lämpölaajenemista kasvaa. Samalla laskettu seinämäpaksuuden minimiarvo on edelleen riittävä turvallisuusvaatimuksien kannalta. (7.)

Table 104.1.2-1 Values of y

| Material | Temperature, °F (°C) | | | | | | | 1,250 (677) and Above |
|--|------------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------------------------|
| | 900 (482) and Below | 950 (510) | 1,000 (538) | 1,050 (566) | 1,100 (593) | 1,150 (621) | 1,200 (649) | |
| Ferritic steels | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| Austenitic steels | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| Nickel alloy UNS No. N06690 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | ... |
| Nickel alloys UNS Nos. N06617, N08800, N08810, N08825 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.7 |
| Cast iron | 0.0 | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Other metals [Note (1)] | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |

KUVA 4. Kertoimen y arvot (5)

3.2.5 Toleranssit ja paksuuslisät

Suure A kaavoissa 1 ja 2 on ohenemisvara, ja se huomioi kaikki mahdolliset seinämän ohenemiset putkikomponentin mekaanisen käsittelyn takia tai käytön aikana syntyvät seinämän ohenemiset. Ohenemisvara A on siis kaikkien edellytettyjen lisäpaksuuksien summa.

Ajan myötä putkimateriaalissa voi esiintyä materiaalin syöpyminen eli korroosio, ja sen nopeus on otettava huomioon suunnittelussa. Putken on kestettävä myös silloin, kun seinämäpaksuus vähenee korroosion vuoksi. Korroosiolisäys on

suunnitellun käyttöiän aikana syöpyneen seinämämateriaalin paksuus. Se sisältyy suureeseen A , ja sen arvon putkikomponentin valmistaja yleisesti ilmoittaa materiaalispesifikaatiossa.

Jos putken tai haaran päähän on tulossa kierreltiitos, siihen käytettävä materiaali-paksuus on myös lisättävä laskettuun minimipaksuuteen, jotta putken kestävyys liitoksen ohuemmassa kohdassakin riittää. Samalla tavalla muutkin suunnitellut putken mekaaniset käsittelyt otetaan huomioon lisäpaksuutena.

3.3 Pienin vaadittu seinämäpaksuus, putkikäyrä

Putkikäyrää mitoitettaessa on otettava huomioon, että taivutettaessa käyrän seinämä ulkokaarteessa venyy ja ohenee, kun taas sisäkaarteessa paksuus kasvaa. Toisaalta käytössä putkikäyrän sisäsyrjällä esiintyy suurempia ja ulkosyrjällä vastaavasti pienempiä jännityksiä kuin suorassa putkessa. Näin olleen vaaditun seinämäpaksuuden minimiarvo lasketaan ulko- ja sisäkaarteelle erikseen taivutuksen säde huomioon ottaen.

Standardin B31.1 mukaan seinämän vähimmäispaksuus taivutuksen jälkeen lasketaan kaavalla 3 tai 4.

$$t_m = \frac{PD_o}{2(SEW/I+Py)} + A \quad \text{KAAVA 3}$$

$$t_m = \frac{Pd+2SEWA/I+2yPA}{2(SEW/I+Py-P)} \quad \text{KAAVA 4}$$

missä suureet ovat kohdan 3.2 mukaisia ja I on erikseen sisä- ja ulkosyrjälle määritettävä kerroin:

- sisäsyrjällä:

$$I = \frac{4(R/D_o)-1}{4(R/D_o)-2} \quad \text{KAAVA 5}$$

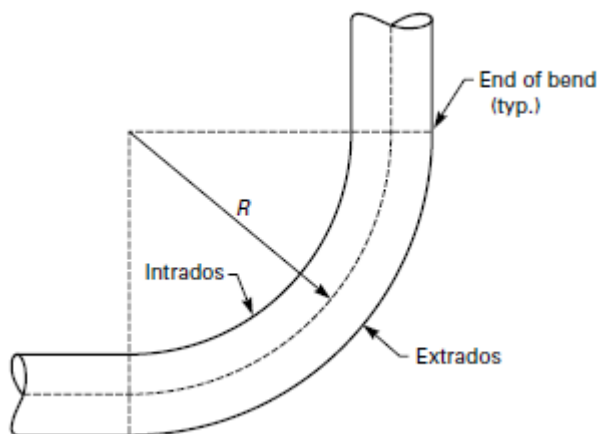
- ulkosyrjällä

$$I = \frac{4(R/D_o)+1}{4(R/D_o)+2}$$

KAAVA 6

Tässä R on putkitaivutuksen säde.

Kuva 5 havainnollistaa taivutuskappaleen osat kuten sisäsyрjä (Intrados), ulkosyrjä (Extrados), taivutuksen säde R ja taivutuskappaleen rajat (End of bend).



KUVA 5. Taivutuskappale

Taivutuskappaleen keskilinjalla $I = 1$. Vaadittu minimipaksuus sisä- ja ulkosyrjän välillä muuttuu asteittain, ja keskilinjalla se on sama kuin suoralle putkelle määritetty. Mitoitettaessa lasketaan vain kaksi äärimmäisarvoa: pienimmät vaaditut seinämät taivutuksen sisä- ja ulkokaarteessa. Kappaleen päissä materiaalipaksuuden on täytettävä suoraputken vaatimukset.

3.4 Pienin vaadittu seinämäpaksuus, aukot ja haaroitukset

Putken haaroituskohdassa materiaalin lujuus heikkenee tehdyn reiän takia ja kestävyys on tarkistettava laskennallisesti. Näin olleen esimerkiksi kattilan yhteiden ja putkihaarojen mitoitus perustuu ns. korvattavan pinta-alan periaatteeseen. Tämän säännön mukaan aukon vahvistus on riittävä, jos yhteen lähellä oleva ns.

ylimääräinen materiaalmäärä on aukon tekemisessä poistettua materiaalmäärää suurempi.

Vahvistustarpeen arviointia ei vaadita, kun haarakappale on valmistettu jonkin taulukon 126.1-1 spesifikaation mukaan ja sitä käytetään spesifikaatiossa mainittujen paineen ja lämpötilan raja-arvojen sisällä. Myöskään suoraan runkoputkeen hitsattaville muhville ja puolimuhville vahvistuslaskelma ei ole pakollinen, jos tietyt standardissa B31.1 mainitut vaatimukset on huomioitu.

”Ylimääräinen” materiaali eli integroitu vahvistus muodostuu pääosin tilattavan putkiseinäpaksuuden valinnan tuloksena tulevasta ylimääräisestä paksuudesta ja hitsausseaman materiaalista. Mukaan lasketaan vain vahvistusalueella oleva putkimateriaali, alueen rajat määritetään laskennallisesti. Standardissa B31.1 on esitetty vahvistuksen tarpeen arviointimenetelmä. Standardimenetelmä soveltuu silloin, kun runko- ja haaraputken akselit leikkaavat toisensa ja ovat 45...90°:n kulmassa.

3.4.1 Haaroituskohdassa vaadittu vahvistuspinta-ala

Standardissa esitetyillä kaavoilla lasketaan olemassa oleva ja vaadittu liitoskohdassa vahvistavan materiaalin määrä poikkipinta-alojen avulla (liite 1). Haaroituskohdassa vaadittu vahvistusmateriaalin pinta-ala lasketaan kaavalla 7.

$$A_7 = A_6(2 - \sin\alpha) = (t_{mh} - A)d_1(2 - \sin\alpha) \quad \text{KAAVA 7}$$

missä

A_7 on vaadittu materiaali-pinta-ala (mm^2),

A_6 on aukon tekemisessä poistetun runkoputken seinämän poikkipinta-ala, laskettu ilman paksuustoleranssia ja lisäpaksuuksia (mm^2),

t_{mh} on kaavoilla 1 tai 2 laskettu runkoputken pienin vaadittu seinämäpaksuus (mm),

α on haara- ja runkoputken välinen kulma (astetta),

d_1 on runkoputkessa tehdyn aukon halkaisija (mm).

3.4.2 Käytössä oleva vahvistuspinta-ala

Integroituun vahvistukseen voidaan käyttää viittä eri materiaalia, ja standardin vaatimusten täyttämiseksi niiden pinta-alojen summan on oltava suurempi kuin vaadittu pinta-ala A_7 (kaava 8):

$$\sum_{i=1}^5 A_i \geq A_7 \quad \text{KAAVA 8}$$

A_1 syntyy runkoputken ylimääräisestä materiaalipaksuudesta (mm^2),

A_2 vastaava alue haaraputkessa (mm^2),

A_3 on kaikkien hitsausseamien poikkipinta-ala (mm^2),

A_4 on mahdollisen vahvistuslevyn poikkipinta-ala (mm^2),

A_5 on mahdollisen satulan poikkipinta-ala (mm^2).

Pinta-ala A_1 määritetään kaavalla 9:

$$A_1 = (2d_2 - d_1)(T_h - t_{mh}) \quad \text{KAAVA 9}$$

missä

t_{mh} on kaavoilla 1 tai 2 laskettu runkoputken pienin vaadittu seinämäpaksuus (mm),

T_h on runkoputken minimi seinämäpaksuus valmistustoleranssi huomioon ottaen (mm),

d_2 on vahvistusalueen leveyden puolikas (mm), joka lasketaan kaavalla 10:

$$d_2 = \max \left\{ d_1; (T_b - A) + (T_h - A) + \frac{d_1}{2} \right\} \quad \text{KAAVA 10}$$

d_1 on runkoputkessa tehdyn aukon halkaisija (mm), joka lasketaan kaavalla 11:

$$d_1 = \frac{D_{ob} - 2(T_b - A)}{\sin \alpha} \quad \text{KAAVA 11}$$

T_b on haaraputken minimi seinämäpaksuus valmistustoleranssi huomioon ottaen (mm),

D_{ob} on haaraputken ulkohalkaisija (mm),

A on kaavoissa 1–4 esitetty putkimateriaalin ohenemisvara (mm).

Pinta-ala A_2 lasketaan kaavalla 12:

$$A_2 = \frac{2L_4(T_b - t_{mh})}{\sin\alpha} \quad \text{KAAVA 12}$$

missä

t_{mh} on kaavoilla 1 tai 2 laskettu runkoputken pienin vaadittu seinämöpaksuus (mm),

T_b on haaraputken minimi seinämöpaksuus valmistustoleranssi huomioon ottaen (mm),

α on haara- ja runkoputken välinen kulma (astetta),

L_4 on vahvistusalueen korkeus haaraputken suunnassa (mm), joka määritetään kaavalla 13:

$$L_4 = \min\{2,5(T_b - A) + t_r; 2,5(T_h - A)\} \quad \text{KAAVA 13}$$

t_r on vahvistuslevyn korkeus tai hitsimateriaalin korkeus (tarkasti määritetty standardissa) (mm).

Pinta-ala A_5 lasketaan kaavalla 14:

$$A_5 = (D_{saddle} - D_{ob})t_r \quad \text{KAAVA 14}$$

missä

D_{saddle} on satulan ulkohalkaisija (mm),

Kun runkoputkessa on hitsausseama mutta haaraliitos ei leikkaa sitä, runkoputken paksuusvaatimuksien määrittämisessä (t_{mh} -arvon laskennassa) saa käyttää saumattoman putken jännitysarvoa. Silloin kun hitsausseama kulkee haarakohdan läpi, hitsausliitoksen lujuuskerrointa W on käytettävä. Lisäksi on vältettävä tilanteita, joissa runko- ja haaraputken saumat leikkaavat toisensa.

Muusta kuin runkoputken materiaalista valmistetulla haaraosalla voi olla eri lujuus kuin runkoputkella. Jos vahvistuspinta-ala lasketaan materiaalille, jonka suurin sallittu jännitysarvo (S_b) on pienempi kuin runkoputkimateriaalille määritetty arvo

(S_h), on tätä pinta-alaa alennettava jännityksien suhteella S_b/S_h . Haaran tai vahvistuslevyn ollessa lujempi tätä ei tarvitse huomioida.

Vahvistusalue (kuva 6, "Reinforcement zone") on suunnikas putken pitkittäisessä leikkauksessa, joka ulottuu vaakasuunnassa etäisyyteen d_2 haaran keskiakselista molempiin suuntiin. Pystysuunnassa alueen alarajana toimii runkoputken sisäpinta, ja se loppuu etäisyyteen L_4 runkoputken ulkopinnasta.

3.5 Pienin vaadittu seinämäpaksuus, kartiot

Laipallisia kartioita, jotka on valmistettu standardispesifikaation mukaan, saadaan käyttää putkistokomponenttina spesifikaatiossa sallituissa paineissa ja lämpötiloissa. Hitsattavan kartion seinämäpaksuuden minimi arvo on sama kuin samasta materiaalista valmistetun nimellismitaltaan saman kokoisen ja painelualtaan vastaavan putken seinämäpaksuus.

3.6 Pienin vaadittu päädyn paksuus

Standardin ASME B31.1 mukaan putkipäädyn on oltava jompikumpi seuraavista: tietyn spesifikaation (standardin taulukko 126.1-1) mukaan valmistettu ja suunniteltu spesifikaatiossa määritettyihin käyttöolosuhteisiin tai suora tukematon, jonka minimipaksuus on määritelty laskennallisesti standardissa kuvatulla tavalla. Päätykappaleen on täytettävä vaatimukset, jotka ovat esitetty ASME BPVC Section I kohdassa PG-31 Unstayed Flat Heads and Covers, ja sen minimipaksuus on laskettava kaavalla 15:

$$t_m = t + A$$

KAAVA 15

missä

t_m on putkipäädyn vaadittu minimipaksuus (mm);

t on putkipäädyn paksuus, joka lasketaan ASME BPVC mukaan (mm),

A on paksuuslisien summa (ks. tämän työn kohtaa 3.2.5) (mm).

Suure t määritetään ASME BPVC, Section I:n kohdan PG-31 mukaan, jossa minimipaksuuden laskentaohjeet on annettu suorille tukemattomille päätykappaleille, kansille ja umpilaipoille. Myös kyseisten päätyosien yleiset sallitut kiinnitystavat runkoputkeen on esitetty standardin kuvassa PG-31. Minimipaksuuden t laskentakaavat ovat esitetty sekä pyöreille että ei-pyöreille (neliönmuotoisille, elliptisille jne.) päädyille (kaavat 16 ja 17):

- pyöreille päätyosille

$$t = d\sqrt{CP/S} \quad \text{KAAVA 16}$$

- ei-pyöreille päätyosille

$$t = d\sqrt{ZCP/S} \quad \text{KAAVA 17}$$

Tässä

d on päädyn halkaisija (tai pienempi leveysmitta ei-pyöreillä päädyillä) (mm),

C on parametri, joka riippuu kiinnitystavasta ja putken koosta (-);

P on laskentapaine (MPa);

S on päädyn materiaalin laskentalämpötilassa sallittu maksimi jännitys (MPa(g));

Z on suure, joka havainnollistaa putken epäpyöreyttä; kerroin Z määritetään kaavalla 18:

$$Z = 3,4 - \frac{2,4d}{D} \quad \text{KAAVA 18}$$

D on epäpyöreän päädyn suurempi mitta, mitattuna kohtisuoraan pienimpään mittaan nähden (mm).

Kaavat 16 ja 17 kelpaavat ei ruuveilla kiinnetyille päädyille. Ruuviliitoksissa jännitys päädyn materiaalissa kasvaa ja silloin tulee käyttää eri laskentakaavoja, jotka on esitetty samassa standardin osassa (kappale PG-31). Tässä työssä ruuviliitoksia ei tarkastella, koska työn tilaajan kannalta sitä ei ollut tarpeellista lisätä laskuriin.

Kaavoissa käytetty parametri C määritetään liitostapauskohtaisesti standardin kuvaa PG-31 käyttäen. Jokaiselle kuvassa esitetylle kiinnitystavalle standardissa on annettu C -arvon laskentasäännöt ja mahdolliset lisäohjeet päädyn paksuuden määrittämiseen.

Sallittu maksimikuorman arvo S otetaan standardista ASME B31.1. Se riippuu päädyn materiaalista ja suunnittelulämpötilasta, ja jännitysarvot haetaan standardin taulukoista A (Mandatory Appendix A) samalla periaatteella kuin suoraputken minimin seinämäpaksuuden määrittämisessä (ks. tämän työn luku 3.2.2).

4 EXCEL-LASKENTAPOHJAN LUOMINEN

Laskentapohjan luominen aloitettiin standardin kaavojen tutkimisella. Kaavoissa käytetyt suuret (ks. kaavat 1 ja 2) järjestettiin aluksi kahteen ryhmään: käsin syötettäviin ja materiaalista riippuviin. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat laskentapaine, komponentin koko ja toleransseja, jotka ovat laskennan lähtötietoja. Muut arvot kuten suurin sallittu jännitys, hitsausliitoksen lujuuskerroin ja parametri y määritetään komponentin materiaalin mukaan. Materiaalista riippuvat suuret ovat taulukoissa ASME B31.1 standardissa, ja yksi tehtävistä on ollut vastaavien taulukkojen luominen Excel-laskentaohjelmaan. Taulukot sijoitettiin erillisiin välilehtiin, kertoimia W ja y sisältävät taulukot oli kopioitu kokonaan ja materiaalin suurimpien sallittujen jännityksien SE/SF -taulukko rajoitettiin tiettyihin materiaaleihin. Materiaalit valittiin työn tilaajan ohjeiden mukaan, ja ne ovat yrityksen projekteissa yleisesti käytetyt putkistomateriaalit. Kyseisistä Excel-tilaukoista arvot haetaan Excel-funktioiden avulla lähtötietojen mukaan. Arvojen välillä tehdään lineaarinen interpolointi.

Työn tavoitteena oli tehdä minimiseinämän laskentatyökalu seuraaville putkikomponenteille: suoraputket ja taivutukset, haaroitukset ja putken päädyt. Excel-laskentataulukko järjestettiin niin, että eri putkikomponenttien laskelmat sijaitsivat eri välilehdillä, joiden rakenne ja ulkonäkö olivat samakaltaisia. Sivun yläosassa syötetään alkuarvoja ja valitaan analysoitavan komponentin materiaalispesifikaatio. Vaadittu minimi seinämäpaksuus lasketaan näiden arvojen perusteella ja vertailaan ehdotettuun tilattuun paksuuteen.

Liitteessä 2 on esitetty laskentataulukon osa välilehdestä ”Suora putki ja taivutus”. Solut, joihin arvoja syötetään käsin, on merkitty harmaalla värillä ja valkoiset solut sisältävät kaavoja. Käyttäjän on valittava materiaalispesifikaatio (”Material”) alasvetovalikosta. Standardin taulukoissa A1–A10 (Mandatory Appendix A) materiaalispesifikaatiot on jaettu taulukkoihin materiaalien koostumuksen mukaan ja taulukon sisällä ne on ryhmitelty tarkoituksen mukaan. Liitteen 2 esimerkissä käytetty spesifikaatio A106 kuuluu taulukkoon A1 Carbon steels ja ryhmään Seamless Pipe and Tube. Materiaalitalukon nimi ja komponentin tyyppi haetaan

automaattisesti "Material"-solussa olevan nimen perusteella. Samalla tavalla soluun "Maximum allowable design temperature" jännitystaulukosta tulee valitun materiaalin suurin sallittu laskentalämpötila-arvo.

Laskentalämpötila ja -paine ovat laskujen lähtötietoina. Laskentapaine on suunnittelupaineen ja hydrostaattisen paineen summa, ja nämä paineet syötetään käsin. Laskentalämpötila syötetään suoraan soluun "Calculation temperature" celsiusasteina. Tätä lukua verrataan sallittuun maksimilämpötila-arvoon. Jos suunnittelulämpötila ylittää maksimiarvon, tästä syntyy varoitusviesti.

Kaikki arvot tässä tiedostossa syötetään kansainvälisessä yksikköjärjestelmässä (SI), joka on Euroopassa yleinen. ASME-standardeissa taulukoitujen arvojen (jännitykset ja lämpötilat) mittayksiköt ovat kuitenkin US-mittayksiköissä, minkä vuoksi laskurissa laskentalämpötila muutetaan US-yksikköihin, jotta standardin taulukkoja olisi mahdollista käyttää. Taulukosta saadut jännitysarvot muutetaan taas SI-yksikköihin ja koko laskelma suoritetaan SI-järjestelmässä ja seinämäpaksuuden laskennan lopputulos on millimetreinä.

Analysoitavan putkikomponentin ulkohalkaisija ja ehdotettu seinämäpaksuus syötetään soluihin "Outside diameter" ja "Ordered wall thickness" millimetreinä. Ohennusvara A on lisäpaksuusarvojen summa, ja lisäpaksuudet syötetään käsin vastaaviin soluihin ("Corrosion/erroosion", "Threading (thread depth)", "Grooving", "Mechanical Strength allowance"). Valmistustoleranssi määritetään komponenttityypin mukaan ("Product type") automaattisesti. Tyyppejä tässä laskurissa on kolme: "Seamless", "Welded" ja "Forgings". Valmistustoleranssiarvona on käytetty 12,5 % saumattomille ja hitsatuille putkille ja on 0 % takeille. Arvot pitävät paikkansa laskurissa käytetyille materiaaleille.

Kun kaikki tarvittavat tiedot on syötetty, ohjelma laskee putkikomponentin vaaditun seinämäpaksuuden minimin (solu "Result: straight pipe") ja vertaa sitä tilattavan putkikomponentin seinämäpaksuuteen valmistustoleranssi huomioon ottaen ja laskee vielä niiden prosenttisuhteen. Jos suhde on yli 100 %, syntyy varoitusviesti ja ehdotettu seinämäpaksuus ei ole riittävä.

Liitteessä 3 on esitetty vastaavat laskennat haaroitukselle. Laskentataulukon rakenne on sama kuin välilehdessä "Suoraputki ja taivutus", mutta taulukkoja on tässä osassa kaksi. Ensimmäisessä lasketaan runkoputken seinämän minimi arvo, toinen sisältää samat laskelmat haaraputkelle ja vahvistustarpeen arvioinnin ("Reinforcement, branch"). Vahvistuksen arviointia varten taulukon "Welds, branch" -osaan on syötettävä hitsausauman koot. Tuloksena saadaan vaadittu sauman paksuus ("Minimum size of attachment weld") ja sen todellinen arvo ("Actual size of attachment weld"), joita vertaillaan keskenään. Seuraavaksi lasketaan vaadittu ja käytössä oleva vahvistuspinta-ala runko- ja haaraputkien kokojen perusteella sekä hitsauspaksuutta huomioon ottaen. Pinta-alat verrataan keskenään ja jos käytössä oleva materiaalmäärä on riittävä, syntyy vahvistusviesti "OK".

Kolmannessa laskurin välilehdessä "Päädyn" (liite 4) lasketaan vaadittu minimipaksuus pyöreille ja ei-pyöreille suorille tuettomille päädylle, jotka on kiinnitetty runkoputkeen ilman ruuveja. Taulukkoon on käsin syötettävä laskentalämpötila ja -paine, päädyn koot, vaaditut paksuuslisät sekä parametri C. Tuloksena saadaan vaadittu minimipaksuus ilman toleranssia ja toleranssit huomioon ottaen.

5 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda sovellus, jota voidaan käyttää laskentatyökäluna paineenalaisten putkikomponenttien mitoituksessa. Työssä laaditulla Excel-laskentataulukolla määritetään pienin vaadittu seinämepaksuus eri putkikomponenteille tietyissä käyttöolosuhteissa. Käytetty laskentamenetelmä perustuu amerikkalaiseen standardiin ASME B31.1 Power Piping. Tämä standardi kattaa teollisuusputkistot ja niiden komponentit, jotka liittyvät voimalaitoskattiloihin tai niiden painelaitteisiin. Työssä laaditulla laskurilla voidaan määrittää suoranputken, taivutuksen, haaraliitoksen ja putkipäädyn riittävä paksuus.

Laskenta tapahtuu ASME B31.1 -standardissa esitetyillä kaavoilla. Monet kaavojen suureista määritetään standardissa taulukkoja käyttäen, ja ne riippuvat suunnitteluolosuhteista. Keskeisessä roolissa laskennoissa on esimerkiksi suurin materiaalille sallittu jännitys tietyssä lämpötilassa. Materiaalit, joille standardin laskentamenetelmä sopii, on ryhmitetty standardissa kahdeksaan eri taulukkoon. Oikea jännitysarvo on luettava taulukosta materiaalin nimen ja laskentalämpötilan mukaan. Tässä työssä laadittuun laskuriin on koottu tietty määrä materiaaleja ja niiden lujuusominaisuudet on otettu standarditaulukoista. Materiaaleiksi valittiin ne, jotka ovat laajasti käytössä työn tilaajan työtehtävissä.

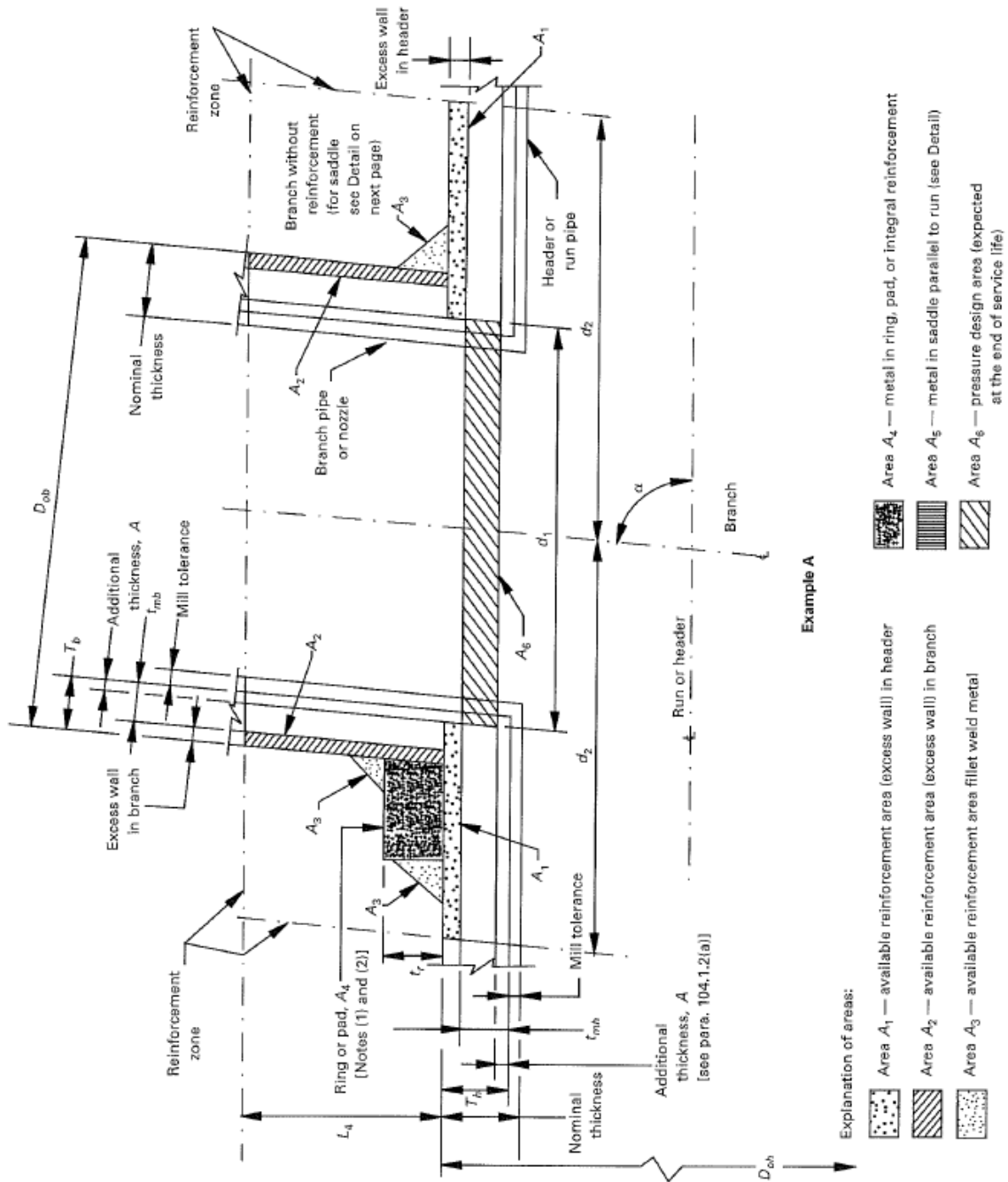
Excel-laskuri hakee tarvittavat lujuusarvot automaattisesti käyttäjän syötettyjen lähtöarvojen perusteella. Samalla periaatteella myös muut kaavoihin kuuluvat suuret määritetään, kun laskentapaine, laskentalämpötila, tarvittavat toleranssit, komponentin materiaali, sekä putkien koot ja ehdotettu seinämepaksuus on syötetty niille tarkoitettuihin soluihin. Tuloksena sovellus laskee standardin mukaan vaaditun materiaalipaksuuden ja varmistaa ehdotetun paksuuden riittävyyden. Haaroituksille tämän lisäksi arvioidaan liitoskohdan lisävahvistuksen tarve ja lasketaan vaadittu hitsausseaman minimipaksuus. Putkipäädylle lasketaan sallitun minimipaksuuden arvo.

Laskuri koostuu lukuisia sivuja sisältävästä Excel-työkirjasta, jota on helppo muokata ja jakaa. Jokaisessa sivussa alkuarvot ja tulokset on koottu kompaktikseen

taulukkoon, ja myös laskuissa käytetyt standardien kaavat on merkitty tuloksien tarkastelun helpottamiseksi. Laskuria voidaan käyttää putkiston mitoituksessa ja suunnitteluprojektin dokumentaation laatimisessa. Tämän työn tuloksia voidaan myös tulevaisuudessa hyödyntää, kun Excel-laskurin toimintoja laajennetaan koskemaan muitakin putkistokomponentteja, esimerkiksi voimakattilan komponentteja, joiden suunnittelussa tulee käyttää standardia ASME BPVC Section I.

LÄHTEET

1. Vahvaa osaamista teollisuuden putkistosuunnittelussa ja asiantuntijatehtävissä. 2018. Oukotek Oy. Saatavissa: <https://oukotek.fi/>. Hakupäivä 16.3.2020.
2. More about standards. 2020. American Society of Mechanical Engineers. Saatavissa: <https://www.asme.org/codes-standards>. Hakupäivä 16.3.2020
3. History of ASME Standards. 2020. American Society of Mechanical Engineers. <https://www.asme.org/codes-standards/about-standards/history-of-asme-standards>. Hakupäivä 16.3.2020
4. ASME Boiler & Pressure Vessel Code. Section I, Rules for Construction of Power Boilers. 2019. New York: The American Society of Mechanical Engineers.
5. ASME B31, Code for Pressure Piping. Section B31.1, Power Piping. 2018. New York, The American Society of Mechanical Engineers.
6. ASTM A106 A106M Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High-Temperature Service. 2010. ASTM International, USA.
7. Antaki, George 2003. Piping and Pipeline Engineering: Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press.



Example A

ASME B31.1 "Power Piping"

Pressure design of Straight Pipes and Bends

Pipe: 168,3mm x4,55mm , A106B

| | | | |
|---|---------------------------------|--------------|--------------------|
| Material | A106B | | |
| <i>Component</i> | Seamless Pipe and Tube | | (Tables A) |
| <i>Structure</i> | Ferritic | | (Tables A) |
| <i>Material groupe (Table 102.4.7-1)</i> | Carbon Steel | | |
| Maximum allowable desing temperature | $T_{max} =$ | 800 F | (Tables A) |
| Calculation temperature | $T =$ | 350 C | |
| | --- | | |
| Design pressure | P_{des} | 13 MPa (g) | |
| Hydrostatic pressure | P_h | 0 MPa (g) | |
| Calculation pressure | P | 13 MPa (g) | |
| Maximum material allowable stress | $SE =$ | 115,42 Mpa | (Tables A) |
| Outside diameter | D_o | 168,3 mm | |
| Ordered wall thickness | t_{ord} | 4,55 mm | |
| Inside diameter with ordered wall thickness | $d_{in} = D_o - 2t_{ord}$ | 159,2 mm | |
| Product type (<i>for mill tolerance</i>) | Seamless | | |
| Mill tolerance, % | 12,5 % | | |
| Mill tolerance, mm | A_{manuf} | 0,57 mm | |
| Corrosion/errosion | A_{corr} | 1,00 mm | |
| Threading (thread depth) | h | 0,00 mm | |
| Grooving | A_{gr} | 0,00 mm | |
| Mechanical strength allowance | A_{mech} | 0,00 mm | |
| Additional thickness | $A = \sum A_i$ | 1,00 mm | |
| (<i>Material groupe to choose</i>) | Ferritic steels | | |
| | $y =$ | 0,4 | (Table 104.1.2 -1) |
| (<i>Material groupe to choose</i>) | Carbon Steel | | |
| Weld strength reduction factor | $W =$ | 1 | (Table 102.4.7 -1) |
| Result: Straight pipe | $t_m =$ | 10,07 mm | (eq. 7) |
| Minimum required wall thickness | $t_m + A_{manuf} =$ | 10,64 mm | |
| | $(t_m + A_{manuf}) / t_{ord} =$ | 234 % | |
| | Not permitted! | | |
| Minimum wall thickness w/o allowances | $t_m - A =$ | 9,07 mm | |
| Actual wall thickness w/o allowances | $t_{ord} - A - A_{manuf} =$ | 2,98 mm | |
| Result: Bend | Bend radius | $R =$ 200 mm | |
| | $l_{(intrados)} =$ | 1,363 | (eq. 5) |
| | $l_{(extrados)} =$ | 0,852 | (eq. 6) |
| Minimum wall thickness w/o allowances | $(t_m - A)_{intrados} =$ | 12,173 mm | |
| | $(t_m - A)_{extrados} =$ | 7,776 mm | |
| Minimum wall thickness with allowances | $t_{m, intrados} =$ | 13,2 mm | (eq. 3) |
| | $t_{m, extrados} =$ | 8,8 mm | (eq. 3) |

ASME B31.1 "Power Piping"

Pressure Design of Welded Branch Connections

Header: 114,3mm x9,75mm , A105

Branch: 114,3mm x9,75mm , A105

Analysis of head material

| | | |
|---|-----------------------------------|----------------|
| Material, header | A105 | |
| Component | Forgings | |
| Structure | Ferritic | |
| Material groupe (Table 102.4.7-1) | Carbon Steel | |
| Maximum allowable desing temperature | $T_{max} =$ | 800 F |
| | | - |
| Calculation temperature | $T =$ | 350 C |
| Design pressure | $P_{des} =$ | 13 MPa(g) |
| Hydrostatic pressure | $P_h =$ | 0 MPa(g) |
| Calculation pressure | $P =$ | 13 MPa(g) |
| Maximum allowable stress | $SE_h =$ | 121,73 MPa |
| Outside diameter | $D_{oh} =$ | 114,3 mm |
| Ordered wall thickness | $T_h =$ | 9,75 mm |
| Maximum inside diameter , ordered | $d = D_{oh} - 2(T_h - A_{manuf})$ | 94,80 mm |
| Inside diameter (with ordered wall thickness) | $d_{ord} = D_{oh} - 2 \cdot T_h$ | 94,8 mm |
| Product type (for mill tolerance) | Forgings | |
| Mill tolerance, % | 0,0 % | |
| Mill tolerance, mm | $A_{manuf} =$ | 0,00 mm |
| Corrosion/erosion | $A_{corr} =$ | 0,10 mm |
| Threading (thread depth) | $h =$ | 0,00 mm |
| Grooving | $A_{gr} =$ | 0,00 mm |
| Mechanical strength allowance | $A_{mech} =$ | 0,00 mm |
| Additional thickness | $A = \sum A_i$ | 0,10 mm |
| (Material groupe to choose) | Ferritic steels | |
| | $y =$ | 0,4 |
| (Material groupe to choose) | Carbon Steel | |
| Weld strength reduction factor | $W =$ | 1 |
| Result: header | $t_{mh} =$ | 5,52 mm |
| Minimum required wall thickness | $t_{mh} + A_{manuf} =$ | 5,52 mm |
| | $(t_{mh} + A_{manuf}) / T_h =$ | 57 % |
| | OK | |
| Minimum wall thickness w/o allowances | $t_{mh} - A =$ | 5,42 mm |
| Actual wall thickness w/o allowances | $T_h - A - A_{manuf} =$ | 9,65 mm |

(Tables A)

(Tables A)

(Tables A)

(Table 104.1.2 -1)

(Table 102.4.7 -1)

(eq. 8)

Analysis of branch material

| | | | |
|--|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Material, branch | A105 | | |
| Component | Forgings | | (Tables A) |
| Structure | Ferritic | | (Tables A) |
| Material groupe (Table 102.4.7-1) | Carbon Steel | | |
| Maximum allowable desing temperature | $T_{max} =$ | 800 F | (Tables A) |
| | | - | |
| Maximum allowable stress | $SE_{b1} =$ | 121,73 MPa | (Tables A) |
| Angle between axes of branch and run | α | 90° | |
| Outside diameter | D_{ob1} | 114,3 mm | |
| Ordered wall thickness | T_{b1} | 9,75 mm | |
| Max. inside diameter with ordered wall thickness | $d = D_{ob1} - 2(T_{b1} - A_{manuf})$ | 94,8 mm | |
| Inside diameter with ordered wall thickness | $d_{ord} = D_{ob1} - 2 \cdot T_{b1}$ | 94,8 mm | |
| Product type (for mill tolerance) | | Forgings | |
| Mill tolerance, % | | 0,0 % | |
| Mill tolerance, mm | A_{manuf} | 0,00 mm | |
| Corrosion/errosion | A_{corr} | 0,10 mm | |
| Threading | h | 0,00 mm | |
| Grooving | A_{gr} | 0,00 mm | |
| Mechanical strength | A_{mech} | 0,00 mm | |
| Additional thickness | $A = \sum A_i$ | 0,10 mm | |
| (Material groupe to choose) | | Ferritic steels | |
| | | $y =$ 0,4 | (Table 104.1.2 -1) |
| (Material groupe to choose) | | Carbon Steel | |
| Weld strength reduction factor | $W =$ | 1 | (Table 102.4.7 -1) |
| Result: branch | $t_{mb1} =$ | 5,52 mm | |
| Minimum required wall thickness | $t_{mb1} + A_{manuf} =$ | 5,52 mm | (eq. 8) |
| | $(t_{mb1} + A_{manuf}) / T_{b1} =$ | 57 % | |
| | | OK | |
| Minimum wall thickness without allowances | $t_{mb1} - A =$ | 5,42 mm | |
| Actual wall thickness without allowances | $T_{b1} - A - A_{manuf} =$ | 9,65 mm | |
| Welds, branch | | | |
| Length of the nozzle outside the shell | | 100 mm | |
| Leg length of the weld (along the shell) | | 9 mm | |
| Leg length of the weld (along the nozzle) | | 9 mm | |
| Minimum size of attachment weld | $t_{c,min}$ | 6,00 mm | |
| Actual size of attachment weld | t_c | 6,36 mm | |
| | $t_c > t_{c,min}$ | OK | |
| Reinforments, branch | | | |
| Altitude of reinforcement zone | L_4 | 24,13 mm | 104.3.1 (d-2) |
| Longitudinal dimension of the opening | d_1 | 95,00 mm | 104.3.1 (d-2) |
| "Half width" of reinforcing zone | d_2 | 95,00 mm | 104.3.1 (d-2) |
| | $d_2 \leq D_{oh}$ | OK | |
| provided by excess pipe wall in the header | A_1 | 401,87 mm ² | 104.3.1 (d-2) |
| provided by excess pipe wall in the branch | A_2 | 204,11 mm ² | 104.3.1 (d-2) |
| provided by weld | A_3 | 81 mm ² | 104.3.1 (d-2) |
| Available reinforcement area | A_{avail} | 686,97 mm ² | |
| Required reinforcement area | A_7 | 514,88 mm ² | 104.3.1 (d-2) |
| | $A_{avail} > A_7$ | OK | |

ASME B31.1 "Power Piping"
Pressure Design of Closures

| | | | |
|---|------------------------|-------------|------------|
| Material, header | A106B | | |
| <i>Component</i> | Seamless Pipe and Tube | | (Tables A) |
| <i>Structure</i> | Ferritic | | (Tables A) |
| <i>Material groupe (Table 102.4.7-1)</i> | Carbon Steel | | |
| Maximum allowable desing temperature | $T_{max} =$ | 800 F | (Tables A) |
| Calculation temperature | T | 350 C | |
| | | - | |
| Design pressure | P_{des} | 15 MPa(g) | |
| Hydrostatic pressure | P_h | 0 MPa(g) | |
| Calculation pressure | P | 15 MPa(g) | |
| Maximum allowable stress | $SE_h =$ | 115,418 MPa | |

Unstayed Flat Heads and Covers (ASME, BPVC, Section I, PG-31)

| | | | | |
|--|----------------|-------|----|-----------------------|
| Factor C | C | 0,3 | | (PG-31.4, Fig.PG-31) |
| Diameter or short span: | d | 114,3 | mm | (Fig. PG-31) |
| Allowances | | | | |
| Corrosion/errosion | A_{corr} | 1 | mm | |
| Threading | h | 0 | mm | |
| Grooving | A_{gr} | | mm | |
| Mechanical strength | A_{mech} | | mm | |
| Additional thickness | $A = \sum A_i$ | 1,000 | mm | |
| Minimum thickness of head, circular (no bolts) | | | | |
| w/o allowances: | $t =$ | 22,57 | mm | (PG-31.3.2 eq.1) |
| with allowances: | $t_m = t + A$ | 23,57 | mm | (ASME B31.1, 104.4.1) |
| Minimum thickness of head, noncircular (no bolts) | | | | |
| long span of noncircular heads | D | 165 | mm | |
| factor Z | $Z =$ | 1,74 | | (PG-31.3.3, eq.4) |
| w/o allowances: | $t =$ | 29,75 | mm | (PG-31.3.3, eq. 5) |
| with allowances: | $t_m = t + A$ | 30,75 | mm | (ASME B31.1, 104.4.1) |