



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

PAINELAITETERÄSPUTKEN SUPISTUS PURISTAMALLA

HögforsGST Oy

TEKIJÄ: Toni Jalkanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Toni Jalkanen	
Työn nimi Painelaiteteräsputken supistus puristamalla	
Päiväys	29.12.2017
Sivumäärä/Liitteet	27
Ohjaaja(t) Seppo Ryyänen, Heikki Salkinoja	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) HögforsGST Oy	
Tiivistelmä	
<p>Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia painelaiteteräsputken supistamista puristamalla ja siinä syntyviä jännityksiä sekä muutoksia materiaalissa. Myös menetelmän kustannustehokkuus oli selvitettävä.</p> <p>Työ aloitettiin perehtymällä nykyisiin menetelmiin ja tapoihin, joilla painelaiteteräsputkea supistetaan. Lisäksi oli tutustuttava puristuskoneeseen ja sen toimintaan, jolla työn aiheena oleva puristamalla tehtävä supistus tullaan suorittamaan sekä kerättävä tietoa käytettävistä putkista. Tämän jälkeen tutustuttiin putken supistamiseen teoriassa ja yritettiin selvittää, kuinka materiaaliin syntyvät jännitykset voidaan todentaa luotettavasti. Jännitysten laskeminen perinteisin menetelmin osoittautui liian haasteelliseksi ja tästä syystä jännitysten selvittämiseksi täytyi käyttää FEM-laskentaa.</p> <p>Puristuskoneella suoritettiin supistustesti jokaiselle koolle ja siitä saadut tulokset kirjattiin. Tulosten pohjalta tehtiin laskelmat muutoksista, joita kappaleissa tapahtui. Lopuksi suoritettiin kustannusvertailu eri tapojen kesken valmistaa vastaavanlainen kappale eri eräko'oissa.</p>	
Avainsanat painelaiteteräsputki, supistus, jännitys, FEM,	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Toni Jalkanen			
Title of Thesis Pressure pipe reduction by compression			
Date	December 29, 2017	Pages	27
Supervisor(s) Seppo Ryyänen, Heikki Salkinoja			
Client Organisation /Partners HögforsGST Oy			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to study the process of pressure pipe reduction by compression method. The cost-effectiveness of the method had also to be clarified.</p> <p>The project was started by looking at the existing methods and ways to make reductions in pressure pipes. It was also necessary to get to know compression machine and its operation. At the same time information on the pipes which are in use was collected. After this it was time to study the theory of pipe reduction and to find out how the tensions in the material can be verified reliably. Calculation of tensions by using traditional methods proved too challenging and for that reason in order to find out the tensions FEM calculation has to be used.</p> <p>Pipe reduction tests were made by compression machine for each size and the results were collected. Calculations were made about the changes in the work piece on the basis of the results. Finally, cost comparison between the different manufacturing methods and different batch sizes was made.</p>			
<p>Keywords pressure pipe, reduction, tension, FEM</p>			

ESIPUHE

Haluan kiittää HögforsGST Oy:tä mahdollisuudesta tehdä tämä opinnäytetyö. Erityiskiitos HögforsGST:n osavalmistuksessa työskenteleville henkilöille, jotka olivat innolla mukana ja mahdollistivat osaltaan työn valmistumisen.

Kiitän lehtori Seppo Ryyntästä työni ohjauksesta ja saamastani avusta sen parissa.

Suuri kiitos myös läheisilleni saamastani tuesta ja kannustuksesta.

Leppävirralla 29.12.2017

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	HÖGFORSGST OY	7
3	LÄMMÖNJAKOKESKUS	7
3.1	Lämmönjakokeskuksen putkisto	8
3.1.1	Määräykset ja ohjeet	9
3.1.2	Suunnitteluolosuhteet	9
3.1.3	Materiaalit ja liitostavat	9
3.1.4	Ensiöpuolen tiiviyskoe ja liitosten tarkastus	9
4	METALLIEN OMINAISUUKSIA	10
4.1	Lujuus.....	10
4.2	Kimmoisuus.....	10
4.3	Sitkeys.....	10
4.4	Muokattavuus (muovattavuus)	10
4.5	Metallien ominaisuuksia tutkivia kokeita	11
4.5.1	Vetokoe.....	11
4.5.2	Iskusitkeys-koe.....	11
4.5.3	Väsytykoe	12
5	PUTKIEN SUPISTAMISEN TEORIAA.....	12
	Supistuksen menetelmät ja niiden tarkastelu.....	12
5.1	Päämenetelmät.....	12
5.2	Takomismenetelmän soveltaminen puristusmenetelmään	13
5.3	Supistamisessa syntyvien jännitysten selvittäminen.....	14
6	FEM-LASKENTA (ELEMENTTIMENETELMÄ).....	14
7	SUPISTETTAVAT PUTKET	17
7.1	Putkikoot ja supistukset.....	17
8	PURISTUSKONE PUTKIEN SUPISTAMISEEN.....	18
8.1	Leukasarjat	18
8.2	Käyttökokemuksia	19
9	PAINELAITETERÄSPUTKEN SUPISTUSTESTI.....	20
9.1	Testissä käytetyt putket.....	20
9.2	Testin suoritus.....	21

9.3	Havainnot.....	21
9.4	Tulokset.....	22
10	KUSTANNUSVERTAILU ERI VALMISTUSMENETELMIEN KESKEN.....	24
10.1	Valmistusmenetelmät	24
10.2	Kustannukset.....	25
10.3	Valmistuseräkoot	25
10.4	Kustannukset.....	25
11	YHTEENVETO	26
	LÄHTEET	27

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä leppävirralaisen HögforsGST Oy:n kanssa. Siinä selvitetään mahdollisuutta muokata painelaiteteräsputkea supistamalla sitä puristusmenetelmän avulla. Yritys on hankkinut puristinkoneen putkien supistamista varten vuonna 2015. Tähän asti putkien supistamista on tehty vain yhden nimelliskoon verran pienemmäksi, mutta jatkossa tarve on tehdä supistuksia myös kahden nimelliskoon verran.

Työn tavoitteena on selvittää, onko painelaiteteräsputkea mahdollista supistaa nykyisin tehtäviä supistuksia enemmän ja vaatiiko se kappaleen jälkikäsitteilyä jännitysten poistamiseksi materiaalista. Työn yhtenä osa-alueena on myös kustannusten selvittäminen ja vertailu vaihtoehtoisten menetelmien kanssa nimelliskoon muuttamiseksi.

2 HÖGFORSGST OY

Yritys on perustettu vuonna 2004 ja se on erikoistunut lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien valmistukseen sekä myyntiin. Alun perin yrityksen nimi oli Oy GST Group Ltd, joka muutettiin nykyiseen nimeen kesällä 2008. Henkilöstömäärä vuonna 2017 on n. 100 henkeä, joista reilu 30 henkilöä työskentelee toimihenkilötehtävissä ja loput tuotantotyöntekijän tehtävissä. Liikevaihto oli vuonna 2016 n. 18,3 M€. (HögforsGST Oy, 2017. Kauppalehti, 2017.)

Tuotteista suurin osa menee kaukolämmitykseen tai -jäähdytykseen. Aluksi tuotevalikoima on pitänyt sisällään vain lämmönjakokeskukset, lämmönsiirtimet ja teollisuuskoneikot, mutta viimeisten vuosien aikana tuotevalikoima on laajentunut yksittäisistä putkistovarusteista hybridi-järjestelmäkonaisuuksiin.

Yrityksen päämarkkina-alueet ovat kotimaan lisäksi Ruotsi ja Norja. Ruotsissa toimii tytäryhtiö, joka hoitaa Ruotsin ja Norjan markkinoinnin sekä myynnin. Yrityksen tuotantotilat sijaitsevat Leppävirralla, jossa kaikki tuotteet valmistetaan.

HögforsGST Oy:n toimintaa ohjaa toimintajärjestelmä. Toimintajärjestelmä huomioi ISO 9001 ja 14001 laatu- ja ympäristöstandardien vaatimukset sekä toimintaan liittyvät lait sekä asiakasvaatimukset. (HögforsGST, 2017.)

3 LÄMMÖNJAKOKESKUS

Lämmönjakokeskus (ks. kuva 1) on lämmönmyyjän mittauskeskukseen sekä kiinteistön käyttövesi- ja lämmitysverkostoihin liitettävä laitekokonaisuus, joka sisältää lämmönsiirtimet, säätö- ja pumpauslaitteet, venttiilit ja varusteet sekä tarvittavan putkiston. (Energiateollisuus ry, 2014.)



Kuva 1. GST-lämmönjakokeskus (HögforsGST Oy, 2017)

3.1 Lämmönjakokeskuksen putkisto

Putkisto on oleellinen osa lämmönjakokeskusta. Sen avulla siirretään nestettä ja ohjataan sen kulkua vesikiertoisissa järjestelmissä. Nesteenä lämmönjakokeskusten kaikissa putkistoissa käytetään normaalisti vettä. Putkistoissa, joissa nesteen lämpötila voi paikoin tai kokonaan laskea alhaiseksi, käytetään jäätymisen estämiseksi veden seassa glykolia tai muuta jäätymistä estävää nestemäistä ainetta. Yleisiä tällaisia kohteita ovat esim. ilmanvaihdon tulokanavan vesipatterit, pihalämmityspiirit ja autotallien lattiat sekä luonnollisesti jäähdytysverkot.

Lämmönjakokeskuksissa on normaalisti kolme erillistä piiriä:

- ensiöpuoli (liitetään kauko- tai aluelämpöverkoston)
- toisiopuoli
 - o käyttövesiverkosto
 - o lämmitysverkosto (voi olla useita)

Painelaiteteräsputkea käytetään ainoastaan ensiöpuolella sekä lämmitysverkostossa. Käyttövedessä painelaiteteräsputken käyttö ei ole sallittua.

3.1.1 Määräykset ja ohjeet

Kaukolämmitykseen kytkettävistä järjestelmistä ja niissä käytettävistä materiaaleista, osista ja niiden ominaisuuksista määrätään monilta osin Energiateollisuus Ry:n julkaisussa "Rakennusten kaukolämmitys, Määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/2013". Julkaisun sisällöstä vastaa Energiateollisuus Ry:n Lämmönkäyttötoimikunta, joka koostuu eri energialaitosten edustajista Suomessa.

Lämmönjakokeskus luokitellaan painelaitteeksi, jolloin sen valmistukseen ja testaukseen sovelletaan myös painelaitedirektiivia 2014/68/EU.

3.1.2 Suunnitteluolosuhteet

Kaukolämpölaitteiden normaalit suunnittelulämpötilat (sisällön korkein lämpötila) ja -paineet (suurin käyttöpaine) ovat

- ensiöpuoli 120 °C / 1,6 MPa
- käyttövesiverkostot 65 °C / 1,0 MPa
- lämmitysverkostot 80 °C / 0,6 MPa

(Energiateollisuus ry, 2014)

3.1.3 Materiaalit ja liitostavat

Ensiö- ja toisiopuolella (lämmitysverkostot) teräsputkina käytetään joko saumattomia teräsputkia, jotka on valmistettu EN 10216-2 mukaisesti tai hitsattuja teräsputkia EN 10217-1, EN 10217-2 tai EN 10217-5 mukaisesti valmistettuna. Putkien materiaali on P235GH.

Ensiöpuolella teräsputkille tehtäviin liitoksiin käytetään EN-standardin mukaisia hitsaus- ja laippaliitoksia. Teräslaippoina käytetään standardin EN 1092-1 mukaisia laippoja. Tasotiivisteinen ulkokierreltiitos vastaa rakenteeltaan laippaliitosta. Käytetyn liitostavan tulee olla hyväksytty ensiöpuolen suunnitteluarvoille. (Energiateollisuus ry, 2014.)

Toisiopuolella lämmitysverkostoissa yleisimmin käytetyt liitostavat ovat hitsaus, laippaliitos, kierreltiitos sekä puristusliitos. Käytetyn liitostavan tulee olla hyväksytty toisiopuolen suunnitteluarvoille.

3.1.4 Ensiöpuolen tiiviyskoe ja liitosten tarkastus

Ensiöpuolen tiiviys todetaan kylmällä vedellä suoritettavalla painekokeella. Koepaineen tulee olla painekokeessa 1,3 x suurin sallittu käyttöpaine (= suunnittelupaine). Normaalisti koepaine on 2,1 MPa (1,3 x 1,6 MPa). Koepainetta ylläpidetään vähintään 15 minuuttia. Tarvittessa aikaa jatketaan niin, että kaikkien paineenalaisten osien ja liitosten tarkastaminen on mahdollista painekokeen aikana. Paineenalaisia osia, putkistoja ja niiden liitoksia ei saa eristää tai peittää millään muullakaan, ennen kuin painekoe on suoritettu hyväksytysti. Liitokset tarkastetaan lisäksi silmämääräisesti. Hitsisaumassa oleva vuoto tai muu silmämääräisesti havaittu virhe korjataan poistamalla hitsiaine ja suorittamalla hitsaus uudelleen. (Energiateollisuus ry, 2014.)

4 METALLIEN OMINAISUUKSIA

4.1 Lujuus

Metallien lujuudella tarkoitetaan sen kykyä kestää ulkoisten sekä sisäisten kuormitusten aiheuttamia veto- ja puristusjännityksiä. Jos metalliin kohdistuu dynaamista kuormitusta eli vuoroittain veto- ja puristusjännitystä, metallilta vaaditaan väsymislujuutta. Metallin lujuutta tutkitaan veto-, iskusitkeys- ja väsytykokeiden avulla. Lujuusominaisuuksia ovat mm. vetomurtolujuus (R_m), myötöraja (R_e) ja väsymislujuus. (Lepola & Makkonen, 2003.)

4.2 Kimmoisuus

Kimmoisuus tarkoittaa metallin kykyä palautua alkuperäiseen muotoon ja mittaan ulkopuolisen kuormituksen jälkeen. Metallin kimmoisuus määritetään vetokokeella. (Lepola & Makkonen, 2003.)

4.3 Sitkeys

Sitkeys tarkoittaa metallin kykyä kestää muovautumista ilman siihen syntyvää säröilyä tai repeilyä. Metallin sitkeyttä tutkitaan iskusitkeys-kokeella. Iskusitkeysarvot ilmoitetaan kokeessa käytettyjen lämpötilojen mukaan, koska lämpötilalla on oleellinen vaikutus metallin sitkeyteen. (Lepola & Makkonen, 2003.)

4.4 Muokattavuus (muovattavuus)

Muokkauksella tarkoitetaan kappaleen muodon ja mittojen sekä ominaisuuksien muuttamista plastisen eli pysyvän muodonmuutoksen avulla. Kappaletta voidaan muokata mm. takomalla, valssamalla ja vetämällä. (Lepola & Makkonen, 2003.)

Muokattavuudella puolestaan tarkoitetaan metallin kykyä käyttäytyä plastisesti muodonmuutoksen aikana. Muokattavuus on sitä parempi, mitä suurempi muodonmuutos saadaan aikaan materiaalin repeytymättä plastisen muodonmuutoksen yhteydessä. (Lepola & Makkonen, 2003.)

Kylmämuokkausta tehdään usein huonelämpötilassa, jolloin se tapahtuu metallin rekristalisaatiolämpötilan (uudelleen kiteytyminen) alapuolella. Tällöin metalli lujittuu kiderajoille syntyvien jännitysten ansiosta. (Lepola & Makkonen, 2003.)

Kuumamuokkaus tehdään taas puolestaan metallin rekristalisaatiolämpötilan yläpuolella, jolloin metalli kiteytyy uudestaan eikä sen vuoksi pääse muokkauslujittumaan, jolloin muokkausvoiman tarve jää huomattavasti pienemmäksi. (Lepola & Makkonen, 2003.)

4.5 Metallien ominaisuuksia tutkivia kokeita

4.5.1 Vetokoe

Vetokoe on yleisin metallien lujuutta määrittelevä menetelmä. Sillä saadaan määriteltyä tutkittavan koemateriaalin kimmoisuus, myötöraja ja vetomurtolujuus. Koe suoritetaan koepenissä, joka tulostaa kokeen aikana käytettävän voiman (vetojännityksen) sekä koesauvassa tapahtuvat mittamuutokset (venymisen). Kimmoalueella ei tapahdu kuormituksesta aiheutuvia pysyviä muodonmuutoksia, vaan koesauva palautuu alkuperäiseen mittaansa, jos vetojännitys poistetaan. Kun materiaalin kimmoisuus loppuu, alkaa koesauva voiman kasvaessa myötäämään ja samalla siinä tapahtuu plastista eli pysyvää muodonmuutosta, venymistä. Kimmoalueen päättymisrajaa nimitetään yleemmäksi myötörajaksi (R_{eH}). Myötörajalla (R_e) tapahtuu koesauvassa pientä osittaista sisäisten jännitysten purkautumista, jonka seurauksena syntyy värähtelyä ja se kuvastuu jännitys-venymäkäyrässä terävänä aaltokuviona. Aaltokuvion alaosa nimitetään alemmaksi myötörajaksi (R_{eL}). (Lepola & Makkonen, 2003.)

Myötörajan jälkeen koesauvassa tapahtuu muokkauslujittumista ja tasaista venymistä vetojännityksen kasvaessa ja siitä käytetään nimitystä tasavenymäalue. Tämän alueen korkein piste tunnetaan murtorajana, jonka perusteella määritetään vetomurtolujuus (R_m). Murtorajan (R_m) jälkeen koesauva venyy ja ohenee paikallisesti, jolloin tämän kohdan sisällä tapahtuu pientä repeilyä, kunnes koesauva katkeaa. Myötöraja (R_e) on yleinen lähtökohta materiaalin ja rakenteiden lujuuslaskelmille sekä mitoituksille, koska tällöin jännitykset jäävät kimmoalueelle ja venymä palautuu kuormituksen aiheuttaman jännityksen poistuttua. Silloin kun kuormitukset pysyvät kimmoalueella, ei materiaaliin pääse syntymään pysyviä muodonmuutoksia. (Lepola & Makkonen, 2003.)

4.5.2 Iskusitkeys-koe

Iskusitkeys-kokeella tutkitaan metallin sitkeyttä eri lämpötiloissa. Iskusitkeydellä tarkoitetaan metallin kykyä vastustaa murtumista iskumaisessa kuormituksessa. Metallin koventuessa sen sitkeys heikkenee. Sitkeys heikkenee myös lämpötilan alentuessa. Mitä kovempi ja hauraampi metalli on, sitä vähemmän siinä on havaittavissa varoittavia rakenteen muodonmuutoksia ennen sen rikkoutumista. (Lepola & Makkonen, 2003.)

Iskusitkeys-koe on standardoitu ja se tehdään Charpyn heilurivasaralla. Koesauvat irrotetaan tutkittavasta materiaalista valssaussuuntaisena tai poikittain siihen nähden ja ne valmistetaan standardimittojen mukaan joko V-lovisauvaksi sitkeille tai U-lovisauvaksi hauraille materiaaleille. Kokeessa käytettävät koesauvat jäähdytetään kokeenmukaiseen lämpötilaan, joka merkitään testauspöytäkirjaan. (Lepola & Makkonen, 2003.)

4.5.3 Väsytysoe

Metallin ollessa dynaamisessa kuormituksessa eli vuorottain veto- ja puristusjännityksessä, se voi murtua tietyn kuormitusajan jälkeen siitä huolimatta, että yksittäisen vetojännityksen huippuarvo jää alle vetomurtolujuusarvon. Väsymismurtuma poikkeaa staattisen eli tasaisen kuormituksen aiheuttamasta murtumasta siten, että se ei aiheuta metalliin plastista muodonmuutosta, joka varoittaisi murtumasta etukäteen. Metallin epätasainen raerakenne aiheuttaa väsymisen, koska materiaalin sisäiset jännitykset eivät jakaannu tasan. Tästä johtuen ulkoisten kuormitusten toistuvat jännityssykliä aiheuttavat materiaalin sisäiseen jännityshuippukohtaan särön muodostumisen. Särön kasvaessa rakenteen kantava poikkipinta-ala pienenee ja samaan aikaan särön kasvu nopeutuu, kunnes tapahtuu lopullinen repeäminen. Poikkipintaa, jossa lopullinen irtirepeäminen tapahtuu, nimitetään jäännösmurtuma-alueeksi. Yleisimmin väsymismurtuma alkaa muodostua materiaalissa tai rakenteessa olevasta naarmusta tai terävästä nurkasta. Teräksen väsymislujuus on suurin jännitys, jonka alaisena metalli kestää 10 miljoonaa kuormitusvaihtelua. Jännityksen maksimiarvoa nimitetään väsymislujudeksi eli jännitysamplitudiksi. Väsymislujuus ei ole ainevakio vetomurtolujuuden tapaan. Koetulokset pätevä vain kiillotettuihin koesauvoihin. (Lepola & Makkonen, 2003.)

5 PUTKIEN SUPISTAMISEN TEORIAA

Supistuksen menetelmät ja niiden tarkastelu

5.1 Päämenetelmät

Putkien supistaminen tapahtuu kolmella päämenetelmällä (Rautaruukki Metform, 1996):

- supistaminen pyörötakomalla
- putken pään supistaminen vetorenkaalla
- supistaminen painosorvauksella

Supistus takomalla kilpailee seuraavien etujensa takia painosorvauksen kanssa (Rautaruukki Metform, 1996):

- ei raaka-ainehukkaa
- matalat koneen hankintakustannukset
- matalat työkalu- ja palkkakustannukset
- materiaali muokkauslujittuu
- hyvä pinnanlaatu ja tarkat mittatoleranssit
- taotun tuotteen muodot voivat olla moninaisia

Lähimpänä tässä työssä käsiteltävää menetelmää edellä mainituista päämenetelmistä on takominen. Siinä putki syötetään vastakkain iskevien muottien väliin, jotka muovaavat putken muotinkaiseksi.

Taotun putken seinämän paksuus voidaan laskea $\pm 10\%$ tarkkuudella seuraavalla kaavalla:

$$t_2 = (D_1 \times t_1) / D_2$$

jossa	t_2	mm	taotun putken seinämän paksuus
	D_1	mm	putken ulkohalkaisija ennen takomista
	t_1	mm	putken seinämän paksuus ennen takomista
	D_2	mm	taotun putken ulkohalkaisija

Kaava perustuu teräksen tilavuuden säilymiseen eikä se ota huomioon putken pitenemän aiheuttamaa seinämän ohenemaa. Syntyvien pitenemien perusteella tähän ei ole normaalisti käytännön tarvettakaan. Taottaessa syntyvät pitenemät ovat tavallisesti 2...10% supistettavasta pituudesta. (Rautaruukki Metform, 1996.)

5.2 Takomismenetelmän soveltaminen puristusmenetelmään

Kuten luvussa 5.1 jo mainittiin, päämenetelmistä takominen on lähimpänä yrityksellä käytössä olevaa menetelmää, joten supistamisen teoreettista puolta lähdettiin tarkastelemaan siltä pohjalta. Koska menetelmät kuitenkin poikkeavat käytännössä toisistaan, suoritettiin käytännön testi, jonka tavoitteena oli todentaa molemmissa menetelmissä tapahtuvan materiaalin muokkautumisen olevan lähellä toisiaan.

Testissä koeputkeksi otettiin halkaisijaltaan $\varnothing 42,4$ mm putki, joka supistettiin $\varnothing 33,7$ mm. Supistamattoman putken seinämänpaksuus vaihteli 2,35...2,39 mm välillä. Supistuksen jälkeen seinämänpaksuus vaihteli 2,58...2,80 mm välillä.

Lähtöarvot sijoitettiin kappaleessa 5.1 esitettyyn kaavaan, jolla voidaan laskea taotun putken seinämän paksuus:

$$t_2 = (D_1 \times t_1) / D_2 = (42,4 \text{ mm} \times ((2,39 \text{ mm} + 2,35 \text{ mm})/2)) / 33,7 \text{ mm} = 2,98 \text{ mm}$$

Laskennallinen tulos on suurempi kuin koeputkesta mitattu arvo, mutta kuten jo aiemmin mainittiin, tämä kaava ei ota huomioon putken pitenemistä supistetulta osuudelta, jolloin seinämän paksuus ohenee. Kun huomioidaan kaavassa oleva toleranssi, päästään myös laskennallisesti koeputkesta mitattujen arvojen väliin:

$$t_{2\min} = (1-0,1) \times 2,98 \text{ mm} = 2,68 \text{ mm}$$

Toinen asia jota tarkasteltiin, oli supistetun osuuden pitenemä. Taotun putken pitenemät ovat tavallisesti 2...10% ja oli odotettavissa jo etukäteen, että pitenemä on samaa luokkaa myös puristamalla tehdyssä supistuksessa. Koeputken supistettavan osan pituus lähtötilanteessa oli 85 mm ja supistuksen jälkeen supistetun osan mitta oli 88 mm. Pitenemä oli siis 3 mm, joka on prosentteina n. 3,5 %.

Em. testien perusteella voidaan todeta materiaalin käyttäytyvän vastaavanlaisesti molemmissa menetelmissä. Näin ollen voidaan pitää takomisen teoriaa ja siinä esiintyviä laskentakaavoja riittävän tarkkoina puristusmenetelmää tarkasteltaessa.

5.3 Supistamisessa syntyvien jännitysten selvittäminen

Puristamalla putkeen tehtävän supistuksen materiaaliin aiheuttamien jännitysten laskeminen osoitautui ilman tietokoneavusteista ohjelmaa erittäin haasteelliseksi tehtäväksi. Kappaleeseen syntyvien jännitysten selvittäminen vaatii lukemattoman määrän erinäisiä laskutoimituksia ja tästä johtuen myös virheen mahdollisuus kasvaa, jonka seuraksena saatu tulos voi olla täysin hyödytön jo alkuvaiheessa tapahtuneen pienen virheen myötä.

Kappaleen muokkautuminen olisi pystyttävä selvittämään tarkasti, koska kuten jo edellisessä luvussa tehdyssä testissä voidaan havaita, pelkästään aihiossa oli vaihtelua seinämävahvuuden suhteen ja supistuksen jälkeen vaihtelu oli huomattavasti suurempaa, jolloin poikkipinta-alan vaihtelu vaikuttaa myös jännitysten käyttäytymiseen materiaalissa. Kappaleessa tapahtuu myös eri kohdissa erilaista muokkautumista ja niiden keskinäinen vaikutus toisiinsa täytyisi tuntea riittävän tarkasti. Lisäksi puristuksen yhteydessä kappaleeseen syntyy kitkan myötä lämpöä, jolla on myös vaikutusta materiaalin muokkautumiseen. Jokaisessa eri putkikoossa ja niihin tehtävissä supistuksissa lähtöarvot sekä kappaleen muokkautumisaste vaihtelevat, jonka seurauksena puristuksen aikana arvot muuttuvat yksilöllisesti. Lisäksi laskenta tulisi tehdä kahdella eri askeleella, joista ensimmäisenä tarkastellaan tilannetta, jolloin putkea puristetaan lestien välissä haluttuun kokoon ja toisena tilannetta, jossa lestit irtoavat putken pinnasta, jolloin tapahtuu materiaalin elastista palautumista materiaalin kimmoisuudesta johtuen.

Näin ollen materiaaliin syntyviä jännityksiä ei saada selville tämän työn avulla ja ratkaisuna jännitysten sekä kappaleessa tapahtuvien muutosten selvittämiseksi on käyttää FEM-laskentaa.

6 FEM-LASKENTA (ELEMENTTIMENETELMÄ)

FEM-laskenta on tietokoneella tehtävään laskentaan perustuva menetelmä, joka tunnetaan elementtimenetelmänä. Menetelmän luotettavaan käyttämiseen vaaditaan siihen liittyvien teoreettisten näkökohtien ymmärtäminen. (Hietikko, 2013.)

FEM-elementtimenetelmä on tullut viime aikoina yhä yleisemmäksi analysointivälineeksi tietokoneiden laskentakapasiteettien kasvaessa. Menetelmän avulla on mahdollista mallintaa lähes millainen tahansa kappale, kokonaisuus, kuormitus tai materiaaliominaisuus. Aiemmin, aina 60-luvun puoleen väliin saakka, monimutkaisissa rakenteissa esiintyvien jännitysten analysointi oli käytännössä mahdotonta lukuun ottamatta joitakin kehä- ja ristikkorakenteita, jolloin jännitysten ja muodonmuutosten analysointi tapahtui kokeellisin menetelmin. Nykyisin FEM on muuttanut tilanteen niin, että kokeellinen analyysi on entistä harvinaisempaa. (Hietikko, 2013.)

Alun perin FEM oli tarkoitettu lineaaristen muodonmuutosten ja jännitysten laskentaan, mutta pian sen jälkeen huomattiin, että samat periaatteet sopivat erinomaisesti myös muuhun laskentaan, kuten mm. lämmönjohtumiseen, akustiikkaan, värähtelymekaniikkaan ja nesteiden dynamiikkaan. FEM-menetelmässä kappaleen rakenne kuvataan pienemmillä osilla eli elementeillä, jotka on kytketty toisiinsa solmupisteissä. Elementtien muoto on yleensä sidottu eli toisin sanoen vakioitu, mutta elementtien lukumäärää ja niiden kokoja muuttamalla sekä yhdistelemällä niiden verkkoa tarpeen mukaan, on mahdollista mallintaa lähes mitä tahansa kappaleita. (Hietikko, 2013.)

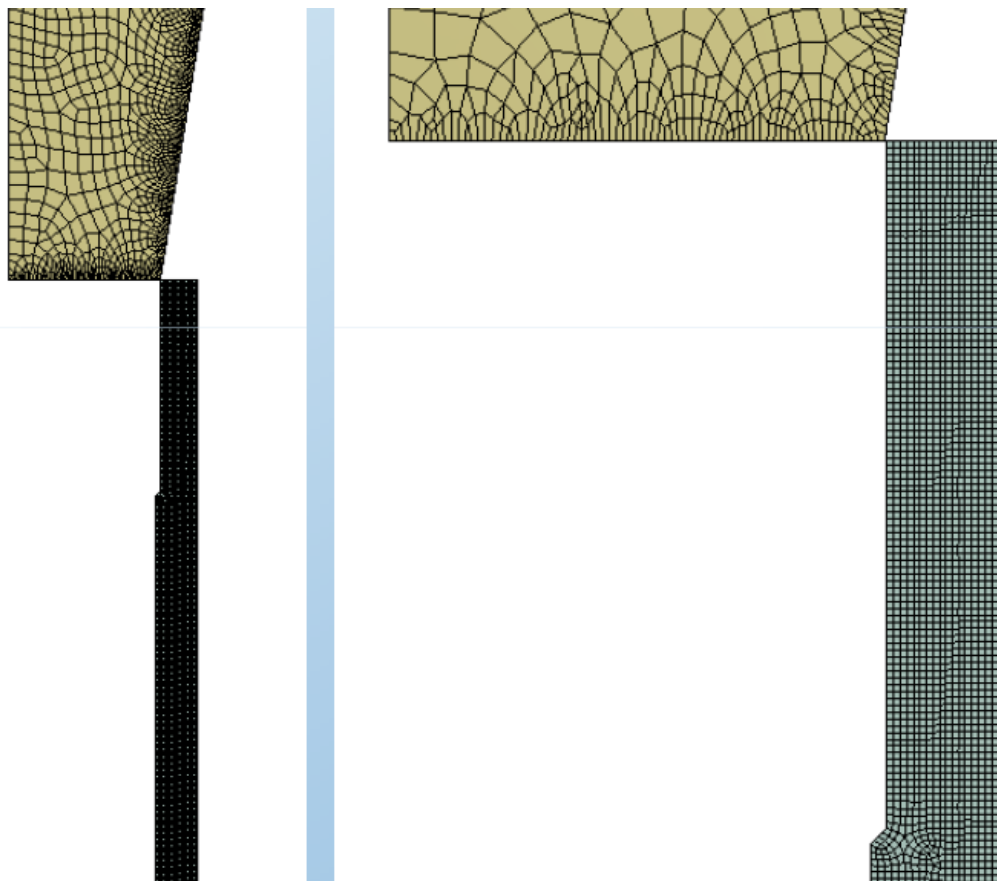
FEM-malli voidaan kuvitella rakenteeksi, joka muodostuu jousista. Ulkoisen kuorman vaikuttaessa siihen, rakenteen kaikki jouset (elementit) muuttavat muotoaan siihen asti, kunnes rakenne saavuttaa jälleen tasapainon. Rakenteen jokaista elementtiä kohden voidaan kirjoittaa tasapainoyhtälöt, jotka yhdistetään yhteensopivuusehtojen avulla solmupisteissä. Materiaalin ominaisuuksien ja solmupisteiden koordinaattien avulla muodostetaan jäykkyyssmatriisi, joka edelleen yhdistetään kuormitukseen ja näin saadaan selville jokaisen solmupisteen siirtymä. Solmupistesiertymien avulla voidaan taas puolestaan laskea rakenteessa (kappaleessa) vaikuttavat jännitykset. Rakenne vaatii yleensä kymmenien, satojen tai jopa tuhansien yhtälöiden yhtälöryhmän ratkaisemista, joten tietokoneen käyttö on ehdoton edellytys. (Hietikko, 2013.)

FEM-analyysin vaiheet ovat:

1. rakenteen idealisointi analyysiä varten
2. elementtiverkon muodostaminen
3. reunaehtojen muodostaminen
4. kuormitusten muodostaminen
5. laskenta
6. tulosten tulkinta ja tarkastelu

Rakenteen idealisoinnin tarkoitus on saada rajoitettua analyysin vaatimaa laskentakapasiteettiä sekä aikaa yksinkertaistamalla rakenteesta löytyviä yksityiskohtia, joiden mallintaminen on työlästä eikä tuloksilla olisi kuitenkaan analyysin kannalta suurta merkitystä. Lisäksi rakenteesta pyritään löytämään symmetriatasoja, joilla voidaan rajoittaa rakenteen analysointi vain osaan rakenteesta, esim. toiseen puoliskoon.

Elementtiverkon muodostaminen aloitetaan valitsemalla sopiva elementtityyppi sekä suunnitellaan samalla, miten rakenne jaetaan elementteihin. Niistä kohdista, joista analyysin tulokset halutaan mahdollisimman tarkkana, on syytä tihentää elementtiverkkoa riittävästi. Sama pätee myös kohtiin, joissa on odotettavissa suuria muutoksia tarkasteltavassa suureessa. Elementtiverkko muodostetaan aiempaa useammin automaattisesti joko CAD-ohjelmassa tai ns. esikäsitelijällä. (Hietikko, 2013.)



Kuva 2. Esimerkki FEM-laskennan yhteydessä tehdyistä elementtiverkoista kappaleisiin. (HögforsGST Oy, 2008)

Kuva 2 on levitettyjen liittimien FEM-analysiraportista, jonka yritys on teetättänyt ulkopuolisella taholla. Analyysin tarkoitus oli selvittää, kuinka erikokoiset liittimet käyttäytyvät, kun niitä venytetään kartiolla suuremmaksi.

Analyysia varten kappaleet mallinnettiin aksisymmetrisinä 2D-kappaleina, jotka pienentävät elementtimallia merkittävästi 3D-malliin verrattuna. Näin saatiin elementtikoko pienemmäksi ja tulosten tarkkuus paremmaksi. Elementin koko säädettiin tapauskohtaisesti niin, että liittimen seinämän läpi oli 15-20 elementtiä. Näin saadaan riittävä tarkkuus plastisen muodonmuutoksen tapauksessa. Kartion liittintä vasten tulevaan pintaan määrättiin sama elementtikoko kuin liittimelle, muuten kartiossa on karkeampi verkko. (HögforsGST Oy, 2008.)

Reunaehtojen muodostaminen tapahtuu rakenteen tuennan mukaan. Kappale vaatii aina jonkinlaisen tuennan, jotta se pysyy paikallaan. Tuet tai tukilaitteet on myös kuvattava elementtimallissa reunaehdoilla, jotka vastaavat mahdollisimman hyvin todellisia tuentoja. Virheellisten tulosten syytä on useimmiten puutteelliset tai väärät reunaehdot. Jo pienikin poikkeama voi aiheuttaa hyvin merkittäviä muutoksia tuloksissa. (Hietikko, 2013.)

Kuormituksista muodostuu toinen suuri ongelma rakenteen mallintamisessa. Ongelma ei esiinny ainoastaan FEM-menetelmää käytettäessä vaan yleisesti lujuuslaskennan yhteydessä. Suuren haas-

teen kuormitusten määrittämisessä aiheuttaa se, että kuormitukset ovat usein epämääräisiä ja hankalasti mitattavia sekä sen verran monimutkaisia, ettei niiden määrittely onnistu ilman suuria yksinkertaistuksia. Elementtimallin kuormitukset voidaan yleisesti syöttää piste-, viiva- tai pintakuormina joko solmupisteisiin tai elementeille. Lisäksi kuormituksia voidaan määrittää myös laajemmille kokonaisuuksille kuten viivoille tai pinnoille sekä ottaa mukaan tilavuus- ja lämpökuormien vaikutukset. Myös materiaalin elastiset ominaisuudet sekä elementtien ominaisuudet on otettava huomioon, joihin liittyen yleensä on määritettävä ainakin kimmokerroin sekä Poissonin vakion arvot. Lisäksi voidaan tarvita esimerkiksi poikkipintasuuksia tai materiaalin paksuutta. (Hietikko, 2013.)

Analyysi suoritetaan joko luonteeltaan staattisena ja lineaarisena, epälineaarisenä tai dynaamisena. Staattinen ja lineaarinen analyysi tarkoittaa sitä, että jännitysten tulee pysyä materiaalin suhteellisuusrajan alapuolella eli kimmokerroin pysyy vakiona ja kuormitukset ovat staattisia (lepäviä). Epälinearisessa analyysissä taas puolestaan siirrytään alueelle, jossa kimmokerroin tai jokin muu osa mallista ei enää käyttyädy lineaarisesti. Dynaamisissa analyyseissa voidaan tarkastella vaihtuvien kuormien vaikutusta väsymislujuuteen tai rakenteen värähtelyihin. Rakenteen stabiilisuutta on mahdollista analysoida samoin kuin lämpötila- ym. kenttien jakautumista rakenteessa. (Hietikko, 2013.)

Tuloksia tarkastellaan analyysin jälkeen ns. jälkikäsittelijällä. Yleisimmin huomiota kiinnitetään rakenteen jännitteisiin ja muodonmuutoksiin. Jännitykset esitetään yleensä joko väripintoina tai korkeuskäyrinä. Analyysissä jännitykset lasketaan joko solmupisteissä tai elementin alueella olevissa pisteissä. Tulosten tarkastelua varten jännitykset kuitenkin tasoitetaan koko rakenteen alueelle kokonaiskuvan saamiseksi. Muodonmuutokset esitetään taas puolestaan yleensä solmupistesiiirtymien avulla, joista voidaan erottaa siirtymät ja kiertymät eri akseleiden suuntaan. FEM-laskennasta saadut tulokset on aina pyrittävä varmistamaan jollain muulla menetelmällä, koska helposti suoritettavan lujuusanalyysin varjopuolena on se, että siinä on myös erittäin helppo tehdä virheitä. Pienet virheet esimerkiksi reunaehdoissa tai materiaalin laadussa voivat johtaa aivan väärin tuloksiin analyysissä. (Hietikko, 2013.)

7 SUPISTETTAVAT PUTKET

Materiaalina käytetään painelaiteteräsputkea P235GH, josta käytetään myös nimitystä kattilaputki. Kyseistä putkea on saatavilla kahdella eri tavalla valmistettuna; saumattomana (EN 10216-2) tai hitsattuna (EN 10217-1, EN 10217-2 tai EN 10217-5). Yritys käyttää standardin EN 10216-2 mukaista saumatonta painelaiteteräsputkea.

7.1 Putkikoot ja supistukset

Supistettavat putkikoot ovat DN20 (Ø26,9) – DN80 (Ø88,9) ja näitä kokoja supistetaan tällä hetkellä vain yhden nimelliskoon eli DN-koon verran. Jatkossa on tarkoitus supistaa putkea myös kaksi DN-kokoa alaspäin, mikäli se on mahdollista tutkittavalla menetelmällä ja osoittautuu kannattavaksi.

8 PURISTUSKONE PUTKIEN SUPISTAMISEEN

Putkien supistamista varten yritys hankki Finn-Power 145 -puristimen vuonna 2015. Puristukseen tarvittava voima tuotetaan hydraulisylinterillä. Puristin on esitetty kuvassa 3.

Koneen oleelliset tekniset tiedot:

Puristusalue	Ø (mm)	10...124
Max avauma	mm	+82
Perusleuan pituus	mm	116
Puristusvoima	kN	3500
Teoreettinen puristumäärä	lkm/h	2400
Perusleukojen sulkeutumisnopeus (max)	mm/s	10



Kuva 3. Puristin Finn-Power 145

8.1 Leukasarjat

Putkien supistaminen haluttuun kokoon tehdään koneeseen asennettavilla leukasarjoilla. Leukasarja muodostuu kahdeksasta erillisestä palasta, joista yksi on kiinteällä paikalla ja loput seitsämän leukaa

liikkuvat tätä kiinteää palaa kohti puristaen leukojen välissä olevaa putkea. Leukasarjoja yrityksellä on käytössä seuraaville putkiko'ille (halkaisijat mm):

DN15 – Ø21,3

DN20 – Ø26,9

DN25 – Ø33,7

DN32 – Ø42,4

DN40 – Ø48,3

DN50 – Ø60,3

DN65 – Ø76,1

Em. koot ovat supistettuja kokoja, joten tällä hetkellä suurin mahdollinen putkikoko, josta putkea voidaan lähteä supistamaan, on DN80 eli Ø88,9.

8.2 Käyttökokemuksia

Puristimesta on saatu runsaasti kokemusta reilun kahden vuoden aikana, jolloin kone on ollut yrityksellä käytössä. Puristus on mahdollista tehdä kertapuristuksena, mutta heti alussa siinä huomattiin ongelma, joka liittyy pinnanlaatuun sekä putken ulko- että sisäpinnassa. Kertapuristus tekee poimut leukojen välisiin kohtiin ja vastaava tapahtuu myös putken sisäpinnalla, kuten kuvassa 4 voidaan nähdä.



Kuva 4. Putken supistus kertapuristuksella

Jotta putken pinnasta saadaan riittävän tasainen, vaatii se usean perättäisen puristuksen sekä, puristusten välissä, putken pyöräyttämistä hieman, jotta leuat osuvat seuraavalla kerralla eri kohtaan putken pinnalla. Lisäksi mitä suurempaa halkaisijan muutosta ollaan tekemässä, sitä tärkeämpää tämä on, että puristusta ei viedä aivan loppuun saakka ensimmäisillä puristuserroilla. Kuvassa 5 supistus on tehty usealla puristuksella puristusten välissä putkea pyörittäen.



Kuva 5. Putken supistus usealla puristuksella

9 PAINELAITETERÄSPUTKEN SUPISTUSTESTI

Työtä varten suoritettiin käytännön testi, jossa testattavat kappaleet otettiin sattumanvaraisesti normaaleista putkieristä. Näin ei tapahtunut valikointia esimerkiksi ulkohalkaisijoissa tai seinämävahvuuksissa esiintyvien vaihteluiden suhteen.

9.1 Testissä käytetyt putket

Putket toimittaa Onninen Oy, joka hankkii putket suoraan putkivalmistajilta. Testissä oli kolmen eri valmistajan putkia. Kaikki putket olivat laadultaan ja valmistusmenetelmiltään samoja, mutta aines- todistuksia tarkasteltaessa oli havaittavissa selkeitä eroja materiaalien kemiallisissa koostumuksissa. Samoin putkierille suoritetuissa testeissä oli havaittavissa selkeät erot myötörajan ja murtovenymän suhteen, mutta murtolujuuden vaihtelu oli pienempää putkierien kesken. Se olikin ainoa asia, jolle oli annettu sekä minimi- että maksimiraja-arvot. Myötörajalle ja murtovenymälle oli pelkästään annettu minimiraja-arvot.

Testissä putkikoot olivat DN20, DN25, DN32, DN40, DN50, DN65 ja DN80. Pienintä kokoa eli DN20:tä lukuun ottamatta kaikkiin putkikokoihin tehtiin 2 erikokoista supistusta. Supistukset putkiin tehtiin kylmämuokkauksena.

Taulukko 1. Testissä käytettyjen putkien tiedot

Putken DN-koko	PUTKEN ILMOITETUT MITTATIEDOT				PERUSTIEDOT		
	Mitat [mm]	Ulko- halkaisija [mm]	Sisä- halkaisija [mm]	Seinämä [mm]	Laatu	Valmistus- standardi	Valmistaja
20	26,9 x 2,3	26,9	22,3	2,3	P235GH	EN 10216-2 TC1	RMH
25	33,7 x 2,6	33,7	28,5	2,6	P235GH	EN 10216-2 TC1	RMH
32	42,4 x 2,6	42,4	37,2	2,6	P235GH	EN 10216-2 TC1	RHM
40	48,3 x 2,6	48,3	43,1	2,6	P235GH	EN 10216-2/13 TC1	ArcelorMittal
50	60,3 x 2,9	60,3	54,5	2,9	P235GH	EN 10216-2 TC1	ZP
65	76,1 x 2,9	76,1	70,3	2,9	P235GH	EN 10216-2/13 TC1	ArcelorMittal
80	88,9 x 3,2	88,9	82,5	3,2	P235GH	EN 10216-2 TC1	RHM

9.2 Testin suoritus

Testi suoritettiin yrityksen osavalmistuksen tiloissa normaaleissa tuotanto-olosuhteissa. Supistukset tehtiin samoilla koneen asetuksilla kuin millä normaalistikin konetta käytetään.

Jokaista tehtävää supistusta varten katkaistiin 200 mm pitkät aihiot, joihin merkittiin puoleen väliin eli 100 mm kohdalle viiva, joka toimi merkinä supistuspituudelle. Kaikki supistukset tehtiin samalle matkalle, jotta niiden keskinäinen vertailu olisi helpompaa. Normaalisissa tuotantotilanteissa eri ko'oilte tehtävät supistukset voivat olla erimittaisia pituudeltaan, josta supistusta lähdetään tekemään.

Putkien ja supistusten halkaisijat mitattiin neljästä kohdasta, koska putket eivät ole täysin pyöreitä. Mittauskohdat merkittiin putkien ja supistusten päihin 45° välein viivoilla. Halkaisijat mitattiin digitaalilla työntömitalla, jonka ilmoitettu mittaustarkkuus on 0,01 mm. Jokaisesta mittauskohdasta otettiin samalla kertaa sekä ulko- että sisähalkaisija, jotta niiden perusteella saatiin laskettua seinämän vahvuus. Mittaustuloksista laskettiin myös keskiarvot, joita käytettiin vertailuissa esimerkiksi putken ilmoitettuihin tietoihin.

9.3 Havainnot

Suoritetun testin perusteella voidaan havaita, että käytettävän putkilaadun mitoissa on suuriakin poikkeamia ilmoitetusta mitasta. Tämä johtuu siitä, että putken valmistuksessa käytetty standardi antaa melko paljon liikkumavaraa etenkin sisähalkaisijan suhteen. Siitä seuraa myös, että sallittu poikkeama on sitä suurempi prosentuaalisesti tarkasteltuna, mitä pienempi putkikoko on. Em. johtuu siitä, että standardissa on ilmoitettu sekä prosentuaalinen että millimetrimääräinen toleranssi ja niistä valitaan se, kumpi on suurempi. Siten pienissä ko'oisissa mennään käytännössä poikkeuksetta millimetritoleranssin mukaan ja prosenteiksi muutettuna sallittu poikkeama on moninkertainen prosenttitoleranssiin verrattuna.

9.4 Tulokset

Ennen varsinaisen testin aloitusta puristuskoneella otettiin aihioista ulko- ja sisähalkaisijoiden mitat neljästä kohdasta ja niiden perusteella laskettiin putkien seinämävahvuudet. Halkaisijoista ja seinämävahvuuksista laskettiin keskiarvot jokaisen testikappaleen molemmille päädyille eli jokaisesta testikappaleesta tuli putken ja supistusten arvot. Yhteenvetotaulukosta laskettiin vielä keskiarvot niiden putkikokojen arvoista, joihin tehtiin kaksi supistusta. Näitä arvoja käytettiin vertailussa putkien ilmoitettuihin nimellistietoihin.

Taulukko 2. Testissä käytettyjen putkien erot putkien ilmoitettuihin nimellistietoihin

PUTKET SUPISTUSTESTIÄ VARTEN 30.11.2017

Putken DN-koko	PUTKEN ILMOITETUT MITTATIEDOT				SUPISTETTAVA PUTKI (keskiarvo)			ERO ILMOITETTUUN KOKOON					
	Mitat [mm]	Ulko-halkaisija [mm]	Sisähalkaisija [mm]	Seinämä [mm]	Ulko-halkaisija [mm]	Sisähalkaisija [mm]	Seinämä [mm]	Ulko-halkaisija [mm]	Ulko-halkaisija [%]	Sisähalkaisija [mm]	Sisähalkaisija [%]	Seinämä [mm]	Seinämä [%]
20	26,9 x 2,3	26,9	22,3	2,3	26,86	21,72	2,57	-0,04	-0,15 %	-0,58	-2,62 %	0,27	11,85 %
25	33,7 x 2,6	33,7	28,5	2,6	34,07	27,78	3,15	0,37	1,09 %	-0,72	-2,54 %	0,55	20,99 %
32	42,4 x 2,6	42,4	37,2	2,6	42,34	36,88	2,73	-0,06	-0,14 %	-0,32	-0,87 %	0,13	5,05 %
40	48,3 x 2,6	48,3	43,1	2,6	48,71	43,28	2,72	0,41	0,86 %	0,18	0,41 %	0,12	4,59 %
50	60,3 x 2,9	60,3	54,5	2,9	60,49	54,12	3,19	0,19	0,32 %	-0,38	-0,69 %	0,29	9,83 %
65	76,1 x 2,9	76,1	70,3	2,9	76,15	69,78	3,19	0,05	0,07 %	-0,52	-0,73 %	0,29	9,83 %
80	88,9 x 3,2	88,9	82,5	3,2	88,69	82,19	3,25	-0,21	-0,24 %	-0,31	-0,37 %	0,05	1,50 %

Putkien kemiallinen koostumus saatiin selville putkierien mukana toimitetuista ainestodistuksista. Niistä kävi ilmi, että kemiallisessa koostumuksessa oli osin suuriakin eroja tiettyjen alkuaineiden kohdalla. Silmämääräisesti tarkasteltuna kolme alkuainetta joissa suurimmat vaihtelut tulivat, olivat kromi (Cr), nikkeli (Ni) ja kupari (Cu). Myös mangaanissa (Mn) esiintyi huomattavaa vaihtelua, mutta sen osuus oli kaikista suurin yksittäisenä ainesosana koko koostumuksesta, joten sen vaihtelu on suhteessa pienempää kuin edellä mainittujen. Sillä voi kuitenkin olla jossain tilanteissa merkitystä kuten myös muillakin edellä mainituilla alkuaineilla, koska ne kaikki huomioidaan hiiliäkvivalentin (CEV) laskennassa, jota käytetään kuvaamaan mm. teräksen hitsattavuutta. Osa valmistajista ilmoittaa suoraan kyseisen arvon ja osa taas ei. Hiiliäkvivalentin arvo riippuu kuitenkin usean eri alkuaineen yhteenlasketuista arvoista, joten jonkin alkuaineen ns. puutetta on mahdollista korvata toisella ja lopputulos voi olla siten jopa parempi.

Taulukko 3. Testissä käytettyjen putkien kemiallinen koostumus

PUTKET SUPISTUSTESTIÄ VARTEN 30.11.2017

Putken DN-koko	KOOSTUMUS, KEMIALLISEN ANALYYSIN TULOKSET (AINESTODISTUS)																
	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Cu	N	Al	Sn	B	CEV
20	6,0 %	23,0 %	49,0 %	0,8 %	0,9 %	0,1 %	0,0 %	0,1 %	16,0 %	14,0 %	4,0 %	22,0 %	0,7 %	2,4 %	1,3 %	0,03 %	0,21
25	6,0 %	23,0 %	49,0 %	0,7 %	0,6 %	0,1 %	0,0 %	0,1 %	12,0 %	12,0 %	3,0 %	19,0 %	0,7 %	2,7 %	1,0 %	0,03 %	0,19
32	6,0 %	22,0 %	48,0 %	0,7 %	0,8 %	0,1 %	0,0 %	0,1 %	12,0 %	11,0 %	3,0 %	15,0 %	0,7 %	2,0 %	0,9 %	0,02 %	0,19
40	9,0 %	22,3 %	57,0 %	1,6 %	0,8 %	-	-	-	6,0 %	3,0 %	0,8 %	9,0 %	-	3,5 %	-	-	-
50	8,0 %	20,0 %	41,0 %	1,2 %	0,7 %	0,1 %	0,6 %	0,1 %	6,0 %	7,0 %	3,0 %	17,0 %	0,9 %	2,2 %	1,1 %	-	-
65	9,0 %	19,9 %	53,0 %	1,3 %	1,0 %	-	-	-	6,0 %	3,0 %	0,8 %	9,0 %	-	3,9 %	-	-	-
80	6,0 %	21,0 %	48,0 %	0,7 %	0,8 %	0,0 %	0,0 %	0,1 %	13,0 %	9,0 %	3,0 %	13,0 %	0,9 %	2,8 %	0,8 %	0,01 %	0,19

Ainestodistuksista selvisi myös putkierille suoritettut testit ja niiden tulokset. Myötörajan minimiarvo on 235 MPa ja maksimiarvoa ei ole määritelty. Kaikkien putkien testitulos oli reilusti minimiarvoa suurempi. Yksi poikkesi kuitenkin selvästi muista ja se oli ainoa, jossa arvo jäi alle 300 MPa. Tästä syystä vaihteluväli kasvoi suuremmaksi, kun muuten arvot olisivat olleet melko pienen alueen sisällä.

Murtolujuuden minimiarvo oli 360 MPa ja maksimiarvo oli 500 MPa. Tässä ei syntynyt suurta vaihtelua ja siten vaihteluväli jäi kohtuullisen pieneksi sallittujen arvojen välissä. Murtovenymälle on annettu ainoastaan minimiarvo, joka on 25%. Kaikki arvot olivat selvästi minimiarvon yläpuolella. Vaihteluväli kuitenkin kasvoi melko suureksi.

Taulukko 4. Putkivalmistajan suorittamat eräkohtaiset testit

PUTKET SUPISTUSTESTIÄ VARTEN 30.11.2017

Putken DN-koko	TESTITULOKSET										
	Ainestod. pvm	Testinro	Myötöraja [MPa]			Murtolujuus [MPa]			Murtovenymä [%]		
			min	max	testattu	min	max	testattu	min	max	testattu
20	23.11.2017	295576	235	-	331	360	500	410	25 %	-	57,0 %
25	17.8.2017	293726			326			423			42,5 %
32	8.11.2017	294683			331			424			46,9 %
40	20.10.2017	90714K			290			411			34,5 %
50	17.11.2017	A047719/17			361			422			39,9 %
65	8.9.2017	89486Y			348			429			32,0 %
80	11.10.2017	394383			329			405			34,6 %

Supistustestin muut tulokset ja niiden pohjalta tehdyt laskelmat ovat raportin liitteenä (LIITE 1), joka ei ole julkinen.

10 KUSTANNUSVERTAILU ERI VALMISTUSMENETELMIEN KESKEN

Menetelmän kannattavuuden selvittämiseksi tehtiin kustannuslaskelmia, joissa vertailtiin kolmea eri tapaa valmistaa 200 mm pitkä kappale, jossa toisessa päässä on tasopintainen mutteriliitos kahdessa eri koossa (pl. DN20). Työssä mukana ollut suurinta kokoa (DN80) ei otettu mukaan laskelmiin, koska sille ei löydy erillisiä liittimiä samaan tapaan kuin pienemmille ko'oilte.

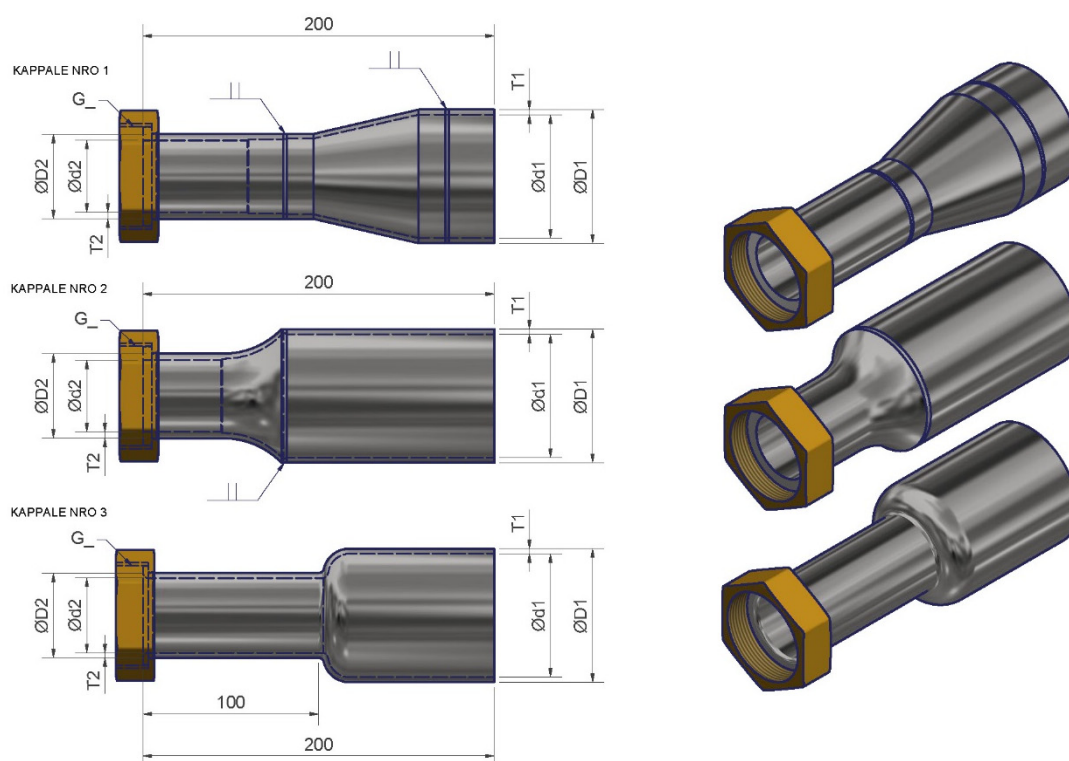
Laskelmissa on otettu huomioon kappaleen muodostamiseen vaadittavat komponentit sekä kyseisen tavan vaatimat työvaiheet. Sellaiset kustannukset tai työvaiheet, jotka ovat samat kaikille tavoille, ei ole otettu laskelmissa huomioon. Esimerkiksi putken noutamista putkihyllystä sahalle ei ole otettu huomioon, koska kappaleen valmistustavasta riippumatta sen noutamiseen kuluu sama aika.

10.1 Valmistusmenetelmät

Tavassa 1 kappale nro 1 valmistetaan osin standardiosista, mutta liittimien osalta käytettiin yrityksen suunnittelemaa hitsattavia liittimiä. Kappale muodostuu liittimestä, mutterista, supistuskappaleesta sekä putkesta.

Tavassa 2 kappale nro 2 valmistetaan em. tapaan, mutta ilman supistuskappaletta ja erilaisella liittimellä. Liittimenä tässä toimii levitetty liitin, joka on tehty ns. suoran liittimen pohjalta.

Tavassa 3 kappale nro 3 valmistetaan tämän työn aiheena olevalla menetelmällä eli supistamalla putkea, jonka jälkeen supistettu pää laipoitetaan mutteriliitosta varten.



Kuva 6. Kustannusvertailussa käytetyt kappaleet

10.2 Kustannukset

Komponenttien hinnat on otettu yrityksen ERP-järjestelmän nimiketiedoista 14.11.2017 ja ne ovat verottomia hankintahintoja. Työkustannusten laskennassa on käytetty vuodelle 2017 vahvistettua tuntihintaa työlle, jota käytetään yrityksen omakustannuslaskennassa. Jotta työstä aiheutuvat kustannukset olisi mahdollista laskea riittävän tarkasti, selvitettiin eri työvaiheisiin kuluva aika joko ottamalla aikaa tai laskemalla indeksiarvoilla tunnetun työvaiheen ja tietyn koon peruusteella vastaava arvo myös muille ko'oilte.

1. Putken katkaisukustannukset perustuvat DN80-putken katkaisuun kuluvaan aikaan, jonka peruusteella on laskettu kuluva aika pienemmille putkiko'oilte indeksiarvon avulla. Indeksiarvo on puolestaan laskettu hitsiin kuluvaan ajan peruusteella vastaavissa putkiko'oissa.
2. Hitsauksesta syntyvät kustannukset perustuvat WPS-arvoihin. Laskelmissa hitsausvaiheeseen on sisällytetty myös hitsausvaiheen kannalta tärkeät valmistelevat toimenpiteet eli hitsauspintojen puhdistus/hionta, hitsauskoneen asetusarvojen määrittäminen ja heftaus.
3. Putken supistamisesta syntyvät kustannukset perustuvat tätä työtä varten mitattuihin vaiheaikoihin yhteistyössä puristuskoneen käyttäjien kanssa. Koneessa oli valmiiksi määriteltynä ja tallennettuna asetusarvot kaikille ko'oilte, joten niiden osalta ei ole huomioitu muuta kuin tallennetun asetusarvon etsiminen lestisarjan vaihdon yhteydessä.
4. Putken laipoitukseen liittyvät laskelmat ja kustannukset perustuvat koneen käyttäjiltä saatuihin toteutuneisiin aikoihin normaalien tuotantoerien yhteydessä.

10.3 Valmistuseräkoot

Kustannusvertailu tehtiin neljälle eri valmistuseräkoolle, jotka olivat: 1, 20, 50 ja 100 kpl.

Näistä saadut tulokset on koottu neljään eri yhteenvetotaulukkoon siten, että jokaisen valmistuserän yhteenvedossa on vertailtu jokaista kolmea tapaa rinnakkain.

Tavoissa 1 ja 2 valmistuserän koko ei vaikuta yksikkökustannukseen. Tavassa 3 eräkoolla on merkitystä yksikkökustannukseen, koska tässä on huomioitava kaksi tai kolme kertaa koneiden asetus-aika, riippuen siitä supistetaanko yksi vai kaksi DN-kokoa. Tällöin valmistuserän kasvaessa saadaan koneen asetus-aika jaettua useamman kappaleen kesken pienentäen yhteen kappaleeseen kohdistuvaa kustannusta. Laskelmissa ei ole otettu huomioon tavan 3 mahdollisesti vaatimaa jännitysten poistoa ja siitä aiheutuvia kuluja sekä mahdollisia laitteistoinvestointeja.

10.4 Kustannukset

Kustannuslaskelmat ja vertailut eri tapojen välillä ovat raportin liitteenä (LIITE 2), joka ei ole julkinen.

11 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää painelaiteteräsputken supistamista puristusmenetelmällä tehtynä. Tähän liittyen tuli selvittää, mitä muutoksia supistus putkessa aiheuttaa sekä minkälaisia jännityksiä syntyy ja sen myötä mahdollisen kappaleen normalisointi, jossa poistetaan syntyneet jännitykset. Lisäksi menetelmän kustannukset oli selvitettävä ja verrattava niitä nykyisiin menetelmiin.

Opinnäytetyö tarjosi mielenkiintoisen työn, jossa pääsi näkemään materiaalin muokkautumista ja tutustumaan teoriassa metallin ominaisuuksiin. Materiaaliin syntyvien jännitysten laskeminen osoitautui sellaiseksi tehtäväksi, joka on syytä tehdä FEM-analyysin kautta.

Suoritetuissa testeissä nähtiin, että käytössä olevassa putkilaadussa on paikoin suuriakin poikkeamia mitoissa, jotka kylläkin olivat standardin asettamien toleranssien rajoissa, mutta voivat siitä huolimatta aiheuttaa ongelmia tietyissä tilanteissa muissa tuotannon vaiheissa, kuten esimerkiksi putken-taivutuksessa. Suuret toleranssit hankaloittavat myös kappaleiden analysointia, koska tuotantoerien välillä kappaleissa voi olla merkittäviä poikkeamia, jolloin materiaalin vahvuus ja käyttäytyminen muokkaustilanteessa vaihtelevat. Luotettavan analyysin saamiseksi tulisi käyttää toleranssien sallimaa vaihteluväliä ja tarkastella arvoja vaihteluvälin molemmista päistä useammalla analyysillä. Tällöin tulisi varmistettua, sallivatko standardin mukaiset toleranssit tehdä supistukset työssä tutkittavalla menetelmällä riippumatta putkierissä olevista mittavaihteluista.

Kustannuslaskelmista nähtiin, että työssä tutkittu menetelmä ei ole edullisin vaihtoehto yksittäisten kappaleiden tai pienten sarjojen valmistukseen, mutta valmistuserän kasvaessa se muuttuu nopeasti edullisimmaksi vaihtoehdoksi.

Jatkotoimenpiteeksi voidaan ehdottaa supistusten tarkkaa mallintamista, jossa apuna voi käyttää esimerkiksi 3D-skanneria, jolla saadaan otettua muodot tarkasti 3D-malliin. Tässä vaiheessa supistukset olisi myös suositeltavaa leikata keskeltä halki, jolloin päästään helpoiten tarkastelemaan seinämässä tapahtuvia muutoksia. Mallinnusten jälkeen tulisi suorittaa kappaleille FEM-analyysi, jonka tuloksena saataisiin selville kappaleisiin syntyneet jännitykset, plastiset muutokset sekä nurkkakohtiin mahdollisesti venymisestä syntyvät murtumat. Näiden vaiheiden jälkeen nähtäisiin luotettavasti, ovatko kahden DN-koon supistukset mahdollisia ja mitä jälkikäsittelyjä ne vaativat.

LÄHTEET

- ENERGIATEOLLISUUS RY. (2014). Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet, julkaisu K1/2013. Helsinki: Energiateollisuus ry
- HIETIKKO E. (2013). Palkki, lujuuslaskennan perusteet. Helsinki: BoD
- HÖGFORSGST OY. (2017). HögforsGST Oy:n kotisivu. Haettu 22. marraskuuta 2017 yrityksen tietoja: <http://hogforsgst.com/fi/yritys/>
- HÖGFORSGST OY. (2017). HögforsGST Oy:n kotisivu. Haettu 22. marraskuuta 2017 kuva lämmönjako-keskuksesta: <http://hogforsgst.com/assets/img/uudet-tuotekuvat/gst-2-pieni.jpg>
- KAUPPALEHTI. (2017). Yritystiedot, HögforsGST Oy. Haettu 22. marraskuuta 2017 yrityksen julkisia tietoja: <https://www.kauppa-lehti.fi/yritykset/yritys/hogforsgst+oy/19163918>
- LEPOLA P., MAKKONEN M. (2003). Materiaalit ja niiden käyttö. Vantaa: WSOY
- RAUTARUUKKI METFORM. (1996). Ohutseinäputkikäsikirja. Keuruu: Otava