

Pyry Kostamo

TERÄKSISEN KUIVATUSSYLINTERIN HALKAISIJAN KASVATTAMINEN

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Timo Lehtonen & Mikko Vanhatalo
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Pyry Kostamo: Teräksisen kuivatussylinterin halkaisijan kasvattaminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2023

Kuivatusosa on paperikoneen suurin osa ja se viekin noin 60 % koko koneen pituudesta. Suuren kokonsa lisäksi kuivatusosa käyttää jopa 75 % koko paperikoneen kuluttamasta energiasta. Yleisin paperi- ja kartonkikoneiden kuivatusosalla käytetty kuivausmenetelmä on sylinterikuivatus, jossa kuivausprosessiin osallistuu enimmillään jopa 150 kappaletta kuivatussylintereitä. Kuivatusosan korkean energiankulutuksen, pituuden ja hinnan vuoksi sen rakennetta on pyritty kehittämään ja optimoimaan mahdollisimman paljon vuosien saatossa. Kuivatussylinterit ovat perinteisesti valmistettu valuraudasta, mutta teräksiset kuivatussylinterit ovat yleistyneet viime vuosina, koska ne tarjoavat paremman kuivatustehon kuin valurautaiset verrokkinsa. Valuraudasta ja teräksestä valmistettujen kuivatussylintereiden maksimihalkaisijaksi on aikojen saatossa vakiintunut tietty mitta, jota on pidetty optimaalisena maksimihalkaisijana kuivatussylinterille.

Tässä työssä keskityttiin selvittämään, voitaisiinko paperikoneen kuivatusosasta saada tehokkaampi, lyhyempi ja edullisempi, jos siirryttäisi valmistamaan suurempihalkaisijaisia teräksisiä kuivatussylintereitä. Työssä tutkittavalle uudelle maksimihalkaisijalle asetettiin maksimiarvo perustuen sen valmistettavuuteen ja kuljetettavuuteen. Työssä keskityttiin tutkimaan teräksisen kuivatussylinterin halkaisijan kasvattamisen vaikutuksia itse teräksisen kuivatussylinterin rakentamiseen, sen kuljettamiseen ja kuivatusosan geometriaan. Työssä tutkittiin myös halkaisijan kasvattamisen vaikutuksia teräksisen kuivatussylinterin ja kuivatusosan kustannuksiin sekä selvitettiin millaisia investointeja ja toimenpiteitä toimeksiantajan tulisi tehdä, jotta suurempia teräksisiä kuivatussylintereitä voitaisiin alkaa valmistamaan.

Suurempihalkaisijaisen teräksisen kuivatussylinterin rakenteen selvittämisessä käytettiin apuna 3D-mallinnusohjelmaa sekä toimeksiantajan käytössä olevaa lujuuslaskentapohjaa, jonka avulla rakenteelle voitiin suorittaa FEM-analyysi. 3D-mallinnusohjelmaa käytettiin hyödyksi myös selvittäessä suurempihalkaisijaisen teräksisen kuivatussylinterin mahtuvuutta erilaisiin kontteihin kuljetusta varten. Kuivatusosan geometrian selvittämiseen käytettiin hyödyksi toimeksiantajan kuivatusosan simulointia varten tarkoitettua ohjelmaa, jolla pystyttiin selvittämään halkaisijan kasvattamisen vaikutukset kuivatusosan sylinterimäärään, kuivatustehoon ja pituuteen. Kustannuksien laskemisessa ja vertailussa käytettiin hyödyksi toimeksiantajan laskentapohjia, joilla pystyttiin arvioimaan halkaisijan kasvattamisen vaikutuksia teräksisen kuivatussylinterin ja itse kuivatusosan hintaan.

Avainsanat: paperikone, teräksinen kuivatussylinteri, sylinterikuivatus

ABSTRACT

Pyry Kostamo: Increasing the diameter of the steel drying cylinder
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's degree program in Mechanical Engineering
June 2023

Drying section is the largest part of the paper machine and it takes up about 60 % of the entire length of the paper machine. In addition to its large size, drying section uses up to 75 % of the energy which paper machine consumes. The most common drying method used in the drying section of paper and board machines is cylinder drying where up to 150 drying cylinders participate to the drying process. Due to the high energy consumption, length and price of the drying section, many studies have been made over the years to develop and optimize its structure to be as efficient it can be. Drying cylinders are traditionally made of cast iron but steel drying cylinders have become more common in recent years, because they offer better drying rate than their cast iron counterparts. The maximum diameter for drying cylinder is a dimension which has been settled long time ago and it is assumed to be the optimal maximum diameter for a drying cylinder till today.

In this study, the focus was on finding out if the drying section of the paper machine could be more efficient, shorter, and cheaper if old steel drying cylinders gets replaced with bigger diameter steel drying cylinders. For the study there was settled a maximum dimension for the new investigated maximum diameter of the steel drying cylinder based on its manufacturability and transportability. This study was focused to investigate the effects of increasing the diameter of the steel drying cylinder to the structure of the steel drying cylinder itself, to its transportation methods and to the geometry of the drying section. In this study effects of the increasing the diameter of the steel drying cylinder to its costs and to costs to the drying section was also investigated. Also, the research was done for the possible investments and actions client must do first to start to manufacture steel drying cylinders with bigger diameters.

Steel drying cylinder strength calculation model and a 3D modelling program were used as help in determining the structure of the larger steel drying cylinder. FEM-analysis of the structure was possible with strength calculation model made for steel drying cylinders. The 3D modelling program was also used to investigate how bigger diameter steel drying cylinder would fit to different containers used in transportation. To find out the geometry of the drying section, the client's program intended for simulating the drying section was used. Simulating drying section with bigger diameter steel drying cylinders gave results to amount of needed drying cylinders, effects to the drying rate and to the length of the drying section. Client's cost calculation program was used to evaluate the effects of increasing the diameter of the steel drying cylinder to its own costs and to the costs of the drying section.

Keywords: paper machine, steel drying cylinder, cylinder drying

ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Valmet Technologies Oy:n telojen tuotekehitysosastolle kevään 2023 aikana. Työympäristö oli tuttu, koska tein AMK-tutkintoni opinnäytetyön samalle osastolle keväällä 2021.

Haluan kiittää esimiestäni DI Seppo Kupiaista diplomityöpaikasta, käytännön järjestelyistä ja kommentteista työhöni liittyen. Haluan myös esittää erityiset kiitokset DI Teemu Jämsénille ja TKT Kari Jupille työni laadukkaasta ohjaamisesta sekä arvokkaista kommentteista. Tampereen yliopiston puolelta haluan kiittää työni ohjaajia Timo Lehtosta sekä Mikko Vanhataloa.

Lopuksi haluan vielä kiittää vanhempiani ja läheisiäni korvaamattomasta tuesta diplomityön sekä opiskeluiden aikana. Erityisesti haluan kiittää ystävääni Jere Näveriä, jonka kanssa olemme selvinneet yhdessä lukuisista haasteista opintojen varrella. Nyt olen saanut opintoni päätökseen tältä erää ja on aika suunnata kohti tulevia haasteita.

Jyväskylässä, 30.5.2023

Pyry Kostamo

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tavoite & tutkimuskysymykset	1
2. TUTKIMUSOTE	2
2.1 Tutkimusmenetelmät	2
2.2 Aineistonhankinta- ja analyysimenetelmät	3
2.3 Eettisyyden ja luotettavuuden arviointi	4
3. PAPERIN KUIVATUS	5
3.1 Kuivatusosasta yleisesti	6
3.2 Sylinterikuivatus	7
3.2.1 Kuivatussylinteri	7
3.2.2 Lämmönsiirto	9
3.2.3 Kuivatusviira	12
3.2.4 Tyypillisimmät rakenneratkaisut	13
3.2.5 Kaavari	14
4. HUOMIOITAVAT STANDARDIT JA OMINAISUUDET	16
4.1 Painelaitestandardit	16
4.1.1 PED	16
4.1.2 ASME	19
4.2 Staattinen ja dynaaminen käyttäytyminen	20
4.2.1 Dynaaminen heitto	20
4.2.2 Taivutusjäykkyysvaihtelut	21
5. TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT	23
5.1 Taustatietoa ja lähtötilanne	23
5.2 Aikaisemmat tutkimukset ja patentit	24
5.2.1 Aikaisemmat tutkimukset	24
5.2.2 Muiden valmistajien tarjonta	25
5.2.3 Patentit	26
5.3 Päätyrakenne	29
5.3.1 Vaihtoehtoiset rakenneratkaisut	30
5.3.2 Muiden valmistajien rakenneratkaisut	34
5.3.3 Yhteenveto	35
6. TERÄKSISEN KUIVATUSSYLINTERIN HALKAISIJAN KASVATTAMISEN VAATIMUKSET JA VAIKUTUKSET	37
6.1 Rakenteen FEM-analyysi	37
6.1.1 Laskentaohjelman toimintaperiaate	37
6.1.2 Rakenteen FEM-analyysin tulokset	38
6.2 Laakerointi	40
6.3 Isomman terässylinterin kuljettaminen	41
6.4 Kuivatussimuloinnit	43
7. KUSTANNUSVERTAILUT	45

7.1	Valmistuskustannukset	45
	7.1.1 Kustannusjakaumat	46
	7.1.2 Valmistuskustannuksien vertailu	47
7.2	Vaadittavat investoinnit	50
7.3	Kokonaiskustannukset	50
8.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	52
	LÄHTEET	55

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ASME	American Society of Mechanical Engineers
COGS	Cost of Goods Sold
DC	Dry Cargo
D_u	Ulkohalkaisija
EXW	Ex Works
F_v	Viirakuorma
HC	High Cube
l_p	Pääty-pääty pituus
l_v	Vaipan pituus
OT	Open Top
p-p	Peak-to-Peak
PED	Pressure Equipment Directive
P_s	Suunnittelupaine
t_p	Päädyn paksuus
t_v	Vaipan paksuus
v_s	Koneen suunnittelunopeus

1. JOHDANTO

Paperikoneen kuivatusosan perusprosessi, höyrykuivatus sylintereillä, on pysynyt lähes muuttumattomana paperikoneiden keksimisestä lähtien. Kuivatusosa on paperikoneen osista kallein ja pisin sekä kovin energian kuluttaja. Ei siis ihme, että kuivatusosan muokkaamista ja optimoimista varten on tehty useita tutkimuksia vuosikymmenten saatossa. Tästä kehitystarpeesta kumpuaa tämänkin tutkimuksen aihe, joka on teräksisen kuivatussynterinin halkaisijan kasvattaminen. Työn toimeksiantajana toimii Valmet Technologies Oy.

1.1 Tavoite & tutkimuskysymykset

Nykyisin kuivatussynterinin halkaisija on tyypillisesti 1,5 m tai 1,83 m. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, että saadaanko kuivatusosasta tehokkaampi, edullisempi ja lyhyempi, jos siirrytään käyttämään isompihalkaisijaisia kuivatussynterineitä pitäen kuitenkin 2,2 m halkaisijaa ylärajana. Halkaisijan yläraja tulee logistiikkaan ja valmistettavuuteen liittyvistä seikoista.

Työn tavoitteeseen päästään vastaamalla seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Minkälainen rakenne isomman halkaisijan omaavalta terässylinteriltä vaaditaan ja mitkä ovat sen valmistuskustannukset verrattuna aiempaan sylinterikokoon?
2. Mikä vaikutus sylinterin halkaisijan kasvattamisella on kuivatustehoon ja kuivatusosan geometriaan?
3. Mitä toimenpiteitä ja investointeja jouduttaisiin tekemään, jotta suurempia kuivatussynterineitä voitaisiin alkaa valmistamaan?

2. TUTKIMUSOTE

Tutkimusta voidaan lähteä toteuttamaan lähinnä joko teoreettisesti tai empiirisesti. Teoreettisessa tutkimustyyppissä kohdetta tutkitaan vain jo olemassa olevan tiedon perusteella ajatusrakennelman kautta [49]. Empiirisessä tutkimustyyppissä tarkastellaan jo olemassa olevaa tietoa, jonka perusteella muodostetaan hypoteeseja eli oletuksia, joita testataan käytännössä ja selvitetään pitävätkö ne paikkansa. Empiirisen tutkimuksen vaiheisiin kuuluu myös teorian testaamisen lisäksi muun muassa aikaisempiin tutkimuksiin tutustuminen, aineiston kerääminen ja sen käsitteleminen sekä itse tutkimusraportin laatiminen [15].

Tässä tutkimuksessa testaan tutkimuskysymysten muodossa olevia hypoteeseja käytännössä ja tutkitaan pitävätkö oletukset paikkansa. Tämän tutkimuksen tyyppi painottuu täten empiiriseen tutkimukseen.

2.1 Tutkimusmenetelmät

Kehittämistutkimusta ei voida määritellä yksinkertaisesti sen monitahoisen luonteen vuoksi. Kehittämistutkimuksessa kehitys ja tutkimus muodostavat kokonaisuuden, jossa yhdistyy teoria sekä kokeelliset vaiheet. Kehittämistyötä voidaankin lähestyä muun muassa opetukseen liittyvän tutkimuksen näkökulmasta tai insinööritieteisiin liittyvästä näkökulmasta [38].

Vertailevassa tutkimuksessa vertaillaan valittuja kohteita toisiinsa tunnistuen niiden yhtäläisyydet ja erot. Vertailevassa tutkimuksessa voidaan vertailla muun muassa erilaisia tapauksia ja prosesseja, joilla on havaittu yhtäläisyyksiä ja ovat täten vertailukelpoisia. Vertailevassa tutkimuksessa voidaan hyödyntää määrällisiä- ja laadullisia aineistoja ja niiden analyysimenetelmiä [55].

Tämä tutkimus toteutetaan kehittämistutkimuksen ja vertailevan tutkimuksen yhdistelmänä. Ensimmäisessä vaiheessa tutkitaan ja kehitetään yksittäisen kuivatussyylinterin rakennetta, jolloin hyödynnetään kehittämistutkimusta. Kun yksittäisen sylinterin rakenne on selvillä, voidaan vertailevaa tutkimusta hyödyntäen vertailla vanhan ja uuden kuivatussyylinterin toimivuutta ja kuivatustehoa keskenään. Voidaan myös mahdollisesti vertailla kokonaisen paperikoneen kuivatusosan kuivatuskapasiteettia uusilla ja vanhoilla kuivatussyylinterirakenteilla.

2.2 Aineistonhankinta- ja analyysimenetelmät

Aineistonhankintaan liittyvillä menetelmillä tutkija kerää yhteen tutkimukseensa liittyvän aineiston, joka voi olla hyvinkin monimuotoista ja tästä syystä aineistoa voidaan hankkia monella erilaisella tavalla. Tutkittava aineisto voi olla myös jo valmiiksi yhteen kerättyä esimerkiksi jonkun edellisen tutkimuksen jäljiltä, joka helpottaa aineiston hankintaa merkittävästi [3].

Tämän tutkimuksen aineistot hankitaan lähinnä aiheeseen liittyvästä kirjallisuudesta, haastattelemalla alan asiantuntijoita, tutkimalla toimeksiantajan tietokantoja ja tuottamalla aineistoa itse muun muassa lujuuslaskentojen muodossa.

Aineiston analyysiprosessi aloitetaan sillä, että tutustutaan aineistoon ja hahmotellaan siitä tiivistetty kokonaiskuva, jotta sitä olisi helpompi käsitellä. Kun aineisto on muutettu helpommin käsiteltävään muotoon, aloitetaan sitä tutkimaan valituilla menetelmillä. Pelkkää aineiston järjestelyä ei analyysi ole, vaan sen avulla etsitään tutkimuksen kannalta relevantteja asioita ja tulkintoja, joita voidaan hyödyntää omassa tutkimuksessa [22].

Laadullista analyysiä voisi verrata aineiston tiivistämiseen teoreettisempaan muotoon. Sitä voidaan käyttää muun muassa haastattelujen ja artikkeleiden analysointiin. Laadulliselle analyysin toteuttamiselle ei ole olemassa yksiselitteistä toimintatapaa ja sitä voi toteuttaa monella tapaa, kunhan analyysin avulla aineistosta saadaan enemmän irti kuin vaan pelkästään lukemalla [22][58].

Määrällisessä analyysimenetelmässä aineistoa tutkitaan numeerisessa muodossa ja pyritään näin löytämään yhteneväisyyksiä ja eroavaisuuksia. Määrällisen tutkimuksen avulla itsessään pystytään vastaamaan määrällisiin kysymyksiin [29][56]. Määrällisellä ja laadullisella analyysillä voidaan tutkia samoja tutkimuskohteita ja niitä voidaan molempia käyttää samassa tutkimuksessa, vaikka yleisesti laadullisen ja määrällisen analyysin eroavaisuuksia pyritäänkin korostamaan. Analyysimenetelmät voivat olla vahvasti laadullisia, vahvasti määrällisiä tai niiden välimaastosta ja niiden käyttö samassa tutkimuksessa on kiinni tutkijasta [29].

Tässä työssä tullaan käyttämään sekä laadullisia, että määrällisiä aineiston analyysimenetelmiä. Yksittäisen kuivatussyylinterin rakenteeseen ja tutkimukseen perehtyessä voidaan käyttää laadullisia analyysimenetelmiä. Vertailtaessa eri kokoisia kuivatussyylinteriä toisiinsa sekä kuivatusosan simuloinnissa ja vertailussa voidaan käyttää määrällisiä analyysimenetelmiä.

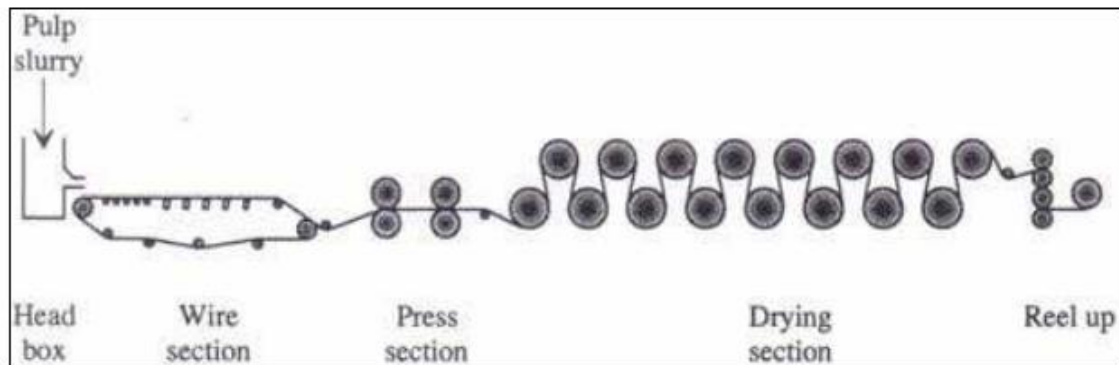
2.3 Eettisyyden ja luotettavuuden arviointi

Työssä käytetyt lähteet on valittu harkiten, niihin viitataan asiaan kuuluvalla tavalla ja ne on merkitty lähdeluetteloon asianmukaisesti. Lähteiksi on pyritty valikoimaan mahdollisimman paljon alkuperäislähteitä ja toimeksiantajan suosimia materiaaleja, joita voidaan pitää luotettavina ja relevantteina. Toimeksiantaja on alansa teknologiajohtaja, joten sisäisiä aineistoja ja ammattilaisten haastatteluja voidaan pitää luotettavina. Julkisesta työstä on myös jätetty pois tietoja, jotka kuuluvat toimeksiantajan liikesalaisuuksien piiriin.

3. PAPERIN KUIVATUS

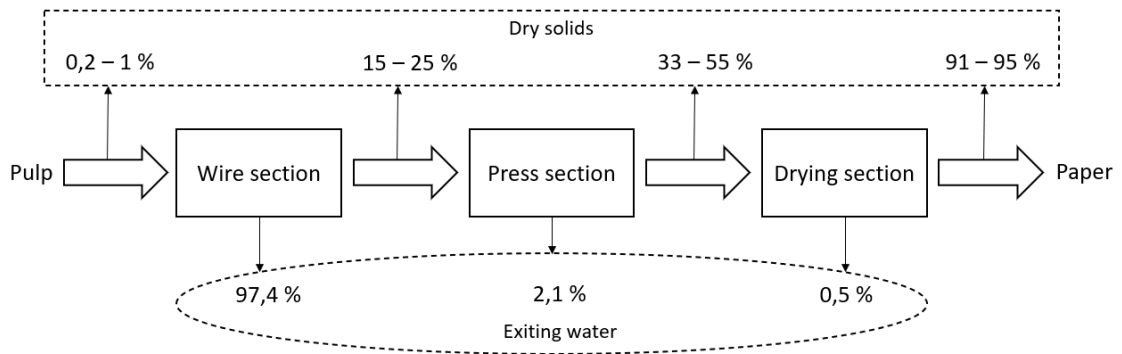
Tämän tutkimuksen aihe koskettaa lähinnä paperikoneen kuivatusosaa ja sen sisällä pyöriä kuivatussyliintereitä. Paperin valmistus on kokonaisuudessaan monimutkainen prosessi, mutta Karlssonin ja Paltakarin mukaan paperin valmistus on käytännössä vain yksi iso kuivatusoperaatio [26].

Paperikoneen keskeisimpiä osia ovat perälaatikko, viira-, puristin-, ja kuivatusosa. Suurin osa vedenpoistosta tapahtuu viira- ja puristinosalla, joka on haluttu tulos, koska veden poistaminen kuivatusosalla on kalliimpaa, kuin edeltävillä viira- ja puristinosalla. Määrällisesti vettä poistuu viiraosalla 97,4 %, puristinosalla 2,1 % ja kuivatusosalla 0,5 %. Kuvassa 1 on esitetty paperikoneen perusrakenne [26][21].



Kuva 1. Paperikoneen periaatteellinen rakenne [21].

Kuivatusoperaatio lähtee käyntiin, kun paperikoneen ensimmäinen osa, eli perälaatikko, syöttää viiraosalle massaa. Massan kuiva-ainepitoisuus on tyypillisesti vain noin 0,2–1 % eli 2–10 grammaa kuitua vesikiloa kohti. Viiraosalla paperirainasta poistetaan vettä painovoiman ja alipaineen avulla. Viiraosan jälkeen rainan kuiva-ainepitoisuus on noin 15–25 %. Viiraosalta paperiraina kulkee puristinosalle, jossa vettä poistetaan mekaanisen puristuksen avulla. Puristinosan jälkeen rainan kuiva-ainepitoisuus on paperin halutusta laadusta riippuen noin 33–55 %. Puristimelta paperiraina vieään kuivatusosalle, jossa siitä poistetaan vettä haihduttamalla. Kuivatusosan jälkeen rainan kuiva-ainepitoisuus on noin 91–95 % [26][21]. Kuvassa 2 on esitetty rainasta poistuvan veden määrä ja kuiva-ainepitoisuus eri paperikoneen osissa.



Kuva 2. Poistuvan veden määrä ja kuiva-ainepitoisuus eri paperikoneen osissa [26].

3.1 Kuivatusosasta yleisesti

Vaikka määrällisesti kuivatusosalla vettä poistuu alle 1 % kokonaismäärästä, silti kuivatusosa käyttää jopa 75 % koko paperikoneen kuluttamasta energiasta. Paperin kuivattamiseen käytetty energia on pääasiassa lämpöenergiaa tai höyryä ja kuivatusosa onkin ylivoimaisesti näiden suurin kuluttaja paperikoneessa [26]. Kuivatusosan suuren energiakulutuksen lisäksi se on massiivisen kokoinen ja hintainen paperikoneen muihin osiin verrattuna. Ghosh mainitseekin, että kuivatusosa on noin 60 % koko paperikoneen pituudesta ja se vie suuren osan sen hankintahinnasta [21]. Kuvassa 3 on esitetty perinteinen kuivatusosa.



Kuva 3. Perinteinen kuivatusosa [27].

Karlssonin ja Paltakarin mukaan muilla paperikoneen osilla on tehty radikaalejakin muutoksia vuosien saatossa, mutta kuivatusosa on pysynyt lähestulkoon samanlaisena paperikoneiden keksimisestä lähtien vaikkakin sen oheislaitteissa on tapahtunut paljonkin kehitystä tänä aikana. Yleisimpänä kuivatusotapana toimii yhä yli 200 vuotta sitten kehitetty metodi, jossa kuivaus tapahtuu höyrylämmitteisten sylinterien avulla [26]. Tämän työn aihe liittyykin sylinterikuivatukseen ja itse kuivatussylinterin rakenteeseen.

Kuivatusosan perusvaatimukset ovat myös pysyneet sama vuosien saatossa, mutta alati lisääntyvät muut vaatimukset ovat tehneet toteutuksesta hankalampaa. Kuivatusosan

päätettävänä on vieläkin toimia viimeisinä kuivatusvaiheena puristimen ja valmiin tuotteen välissä [26]. Karlssonin ja Paltakarin [26] mukaan kuivatusosan ja -prosessin täytyy kyetä seuraaviin perusasioihin:

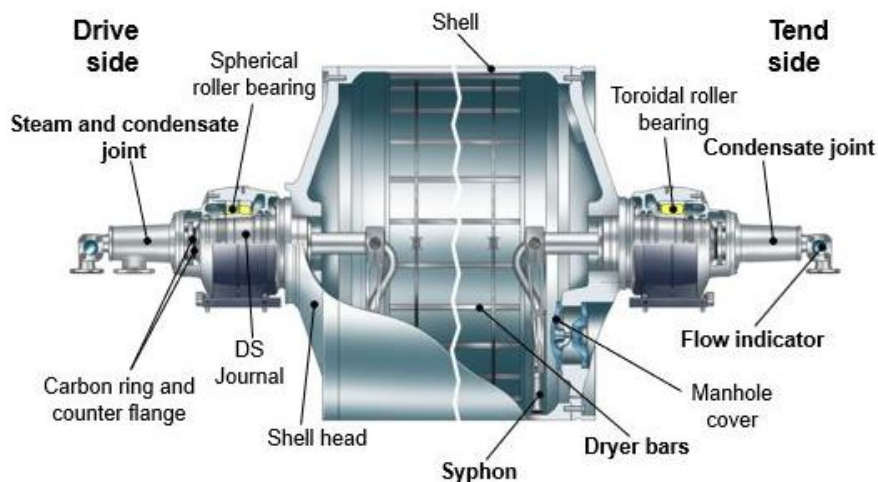
1. Hyvään kuivatuksen hyötysuhteeseen
2. Tuotteen korkeaan laatuun
3. Kuivatusosan hyvään ajettavuuteen
4. Hyvään energiatehokkuuteen

3.2 Sylinterikuivatus

Yleisin paperin ja kartongin kuivaustapa kuivatusosalla on sylinterikuivatus, jossa kuivatusprosessiin osallistuu jopa yli 150 pyörivää kuivaussylinteriä. Sylinterikuivatus tuokin useita etuja kuivatusprosessiin ja se ei ole syyttä ollut suosituin paperin ja kartongin kuivaustapa. Sylinterikuivatuksen etuja ovat muun muassa hyvä energiatehokkuus ja se, että höyryn käyttö sopii hyvin paperi- ja kartonkiteollisuuden energiainfrastruktuuriin. Sylinterikuivatus tuo myös monia etuja paperiradan ajettavuuteen ja laatuun [26][25].

3.2.1 Kuivatussylinteri

Kuivatussylinterit on yleensä valmistettu valuraudasta ja niiden pituudet vaihtelevat 3–11 m välillä. Halkaisijaltaan kuivatussylinterit ovat perinteisesti olleet joko 1,5 m tai 1,83 m. Sylinterin seinämän paksuutta pyritään optimoimaan tapauksittain lämmönsiirron tehokkuuden varmistamiseksi, mutta yleensä seinämän paksuus on välillä 25–45 mm höyrynpaineen ollessa jopa maksimissaan 11 bar [25][53]. Kuvassa 4 on esitetty Valmetin valuraudasta valmistettu kuivatussylinteri.



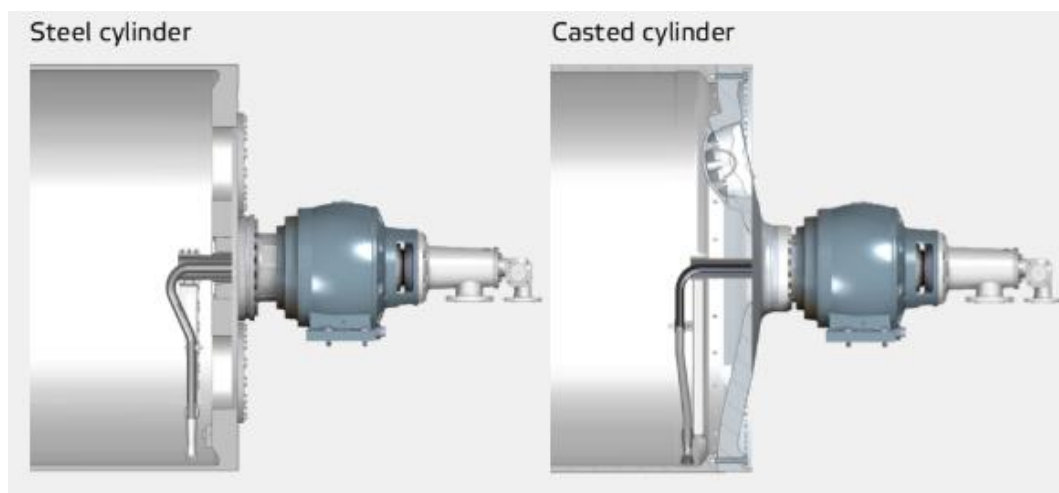
Kuva 4. Valmet valurautainen kuivatussylinteri [52].

Nykyään kuivatussylintereitä on aloitettu valmistamaan myös teräksestä. Perttula toteaa diplomityössään [39], että teräksestä valmistettu kuivatussylinteri tuo hyötyä kuivatusprosessiin valurautaiseen kuivatussylinteriin verrattuna. Terässylinterillä voidaankin saavuttaa jopa 10 % parempi lämmönsiirto ja kuivatusteho samalla höyrynpaineella kuin valurautaisella verrokilla [39][54]. Kuvassa 5 on esitetty Valmetin teräksinen kuivatussylinteri.



Kuva 5. Valmet teräksinen kuivatussylinteri [45].

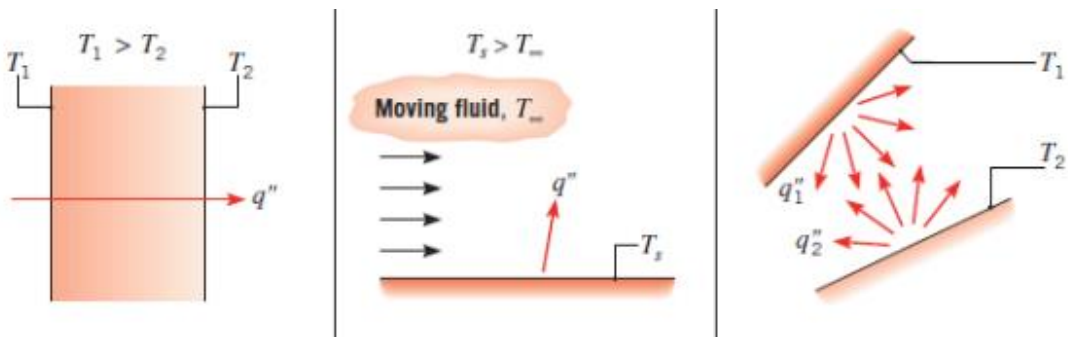
Teräksisessä kuivatussylinterissä vaippa on valmistettu valamisen sijaan taivuttamalla sekä hitsaamalla ja se voi olla jopa 40 % ohuempi, kuin valurautaisella sylinterillä. Terässylinterissä päädyt ovat hitsattu vaippaan kiinni, toisin kuin valurautaversiossa, jossa päädyt ovat pulteilla kiinni. Päätyjen hitsattu rakenne poistaa höyryn vuotomahdollisuudet ja mahdollistaa suuremman kuivatusleveyden [54]. Kuvassa 6 on esitetty samalla laakerileveydellä olevan terässylinterin ja valurautasynterinin päädyt.



Kuva 6. Terässylinterin ja valurautasynterinin päädyrakenteet [54].

3.2.2 Lämmönsiirto

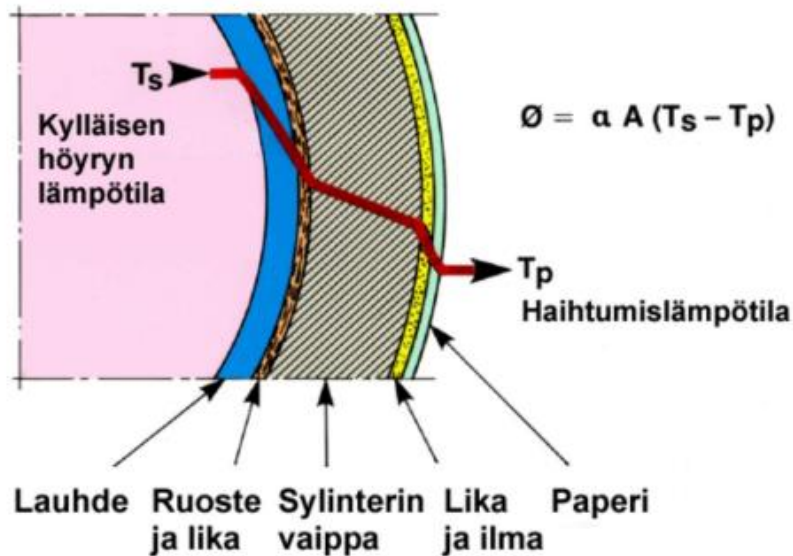
Niskasen mukaan itse kuivatuksen kannalta sillä ei ole väliä, miten lämpöenergia siirretään paperiin, mutta sen sijaan lämpöenergian siirtotapaa valittaessa tulee ottaa huomioon taloudelliset ja laadulliset näkökulmat. Näiden näkökulmien johdosta lämmönsiirto paperiin tehdäänkin tapauksesta riippuen konduktion (johtumisen), konvektion (lämmönsiirtoväliaineen) tai säteilyn kautta. Taloudellisesti kannattavin ja yleisin tapa siirtää lämpöä paperiin on kuivatussyylinterien avulla tapahtuva konduktio. Konvektiota tai säteilylämmitystä käytetään lähinnä vain silloin, kun on tarve käyttää kalliimpaa ja tehokkaampaa menetelmää [21][33]. Kuvassa 7 on esitetty edellä mainitut lämmönsiirtotavat järjestyksessä vasemmalta oikealle: konduktio, konvektio ja säteily.



Kuva 7. Lämmönsiirtotavat [7].

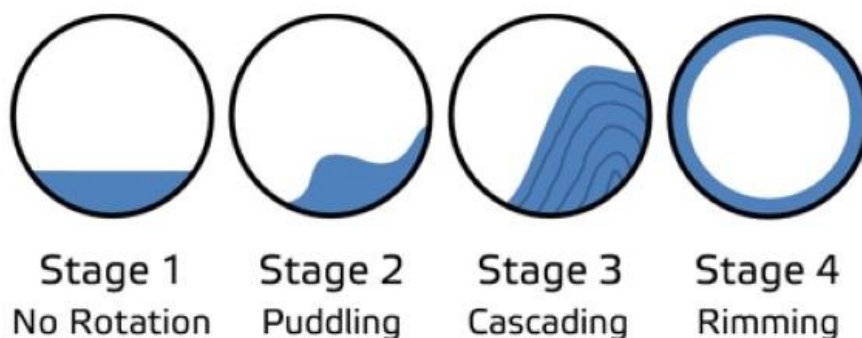
Sylinterikuivatuksen toimintaperiaatteena toimii se, että kuivatusviiraa käyttäen paperirataa painetaan kuivatussyylinterien kuumia pintoja vasten, joista lämpöä siirtyy johtamalla paperirataan. Kuivatussyylinterit ovat lähestulkoon aina höyrylämmitteisiä muutamia erikoistapauksia lukuun ottamatta. Höyryllä lämmitettävän kuivatussyylinterin lämpötila riippuu sen sisältämän kylläisen höyryn paineesta. Kun höyry luovuttaa lämpöä, se lauhtuu ja lopuksi lauhde poistetaan sylinteristä [33].

Niskasen mukaan höyrystä itse paperiin siirtyvään lämpötehoon vaikuttavat välissä olevat kerrokset. Kerroksien yksittäiset vaikutukset riippuvat niiden lämmönjohtavuudesta. Merkittävimmin lämpötehon siirtymiseen vaikuttaa itse kuivatussyylinterin vaipan paksuus [33]. Kuvasta 8 nähdään höyrystä paperiin siirtyvään lämpötehoon vaikuttavat kerrokset.



Kuva 8. Lämpötehon siirtymiseen vaikuttavat kerrokset [27].

Sylinterin sisälle jää aina lauhdekerros, vaikka lauhdetta poistetaankin aktiivisesti sylinterin sisältä. Lauhteen käyttäytyminen sylinterin sisällä vaihtelee riippuen muun muassa sylinterin pyörimisnopeudesta ja halkaisijasta [25]. Karlssonin ja Paltakarin mukaan sylinterin sisälle kerääntyvän lauhdekerroksellakin on suuri negatiivinen vaikutus lämmönsiirtoon [26]. Kuvassa 9 on esitetty lauhteen käyttäytyminen eri vaiheissa.

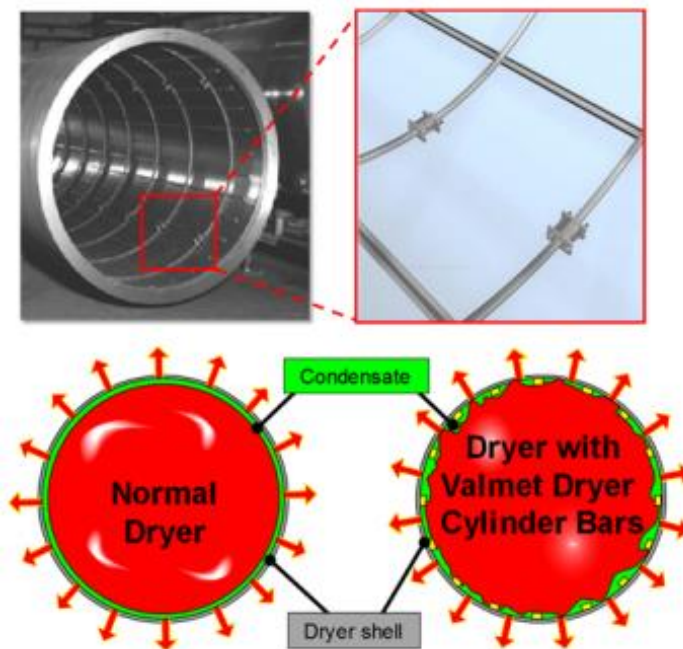


Kuva 9. Lauhteen käyttäytyminen kuivatussylinterin sisällä [47].

Ensimmäinen vaihe on sylinterin pysyessä paikallaan, jolloin lauhde pysyy lammikkona sylinterin pohjalla. Toisessa vaiheessa sylinteri pyörii hitaasti (koneen nopeus alle 150 m/min), jolloin kitka saa lauhteen nousemaa sylinterin seinämää ylöspäin. Vaiheessa kolme lauhde kiipeää lähes ylös asti ja ryöppyää takaisin alas. Ryöppyämistä esiintyy kun koneen nopeus ylittää 150 m/min. Neljännessä ja viimeisessä vaiheessa lauhde muodostaa tasaisen kehän sylinterin seinämälle kun kone saavuttaa noin 300–425

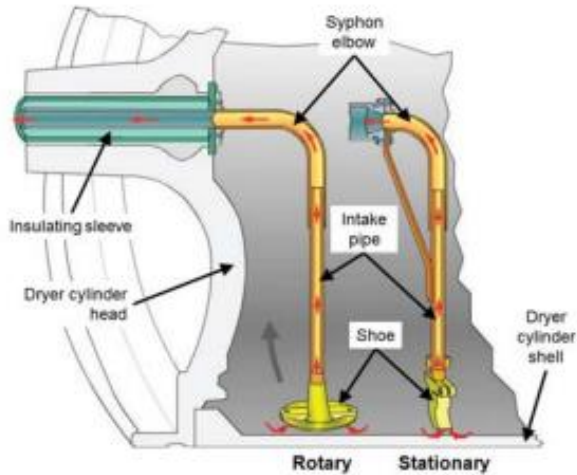
m/min vauhdin. Lauhdekehän muodostumis ja hajoamisnopeuksiin vaikuttavat lauhteen määrä sekä sylinterin halkaisija [25][47][59].

Jupin [25] mukaan nykyään lähes jokaisessa kuivatussylinterissä on lämpölistat, joiden avulla saadaan parempi lämmönsiirto lauhtuvasta höyrystä sylinterin seinämään. Lämpölistat kiinnitetään vaipan sisäpinnalle siten, että ne kestävät lämmöstä aiheutuvia muodonmuutoksia. Lämpölistat rikkovat lauhdekerrosta, jonka ansiosta lämmönsiirto paranee ja energiatehokkuus kasvaa [48][52]. Lämpölistojen positiivinen vaikutus lämmönsiirtoon voi olla jopa 50 %. Lämpölistojen avulla lauhteen käyttäytyminen muuttuu ryöpymisestä tasaiseksi kehäksi pienemmällä nopeudella, jonka ansiosta kuivatussylinterin pyörittämistä varten tarvitaan huomattavasti vähemmän voimaa [59]. Kuvassa 10 on esitetty Valmetin lämpölistat ja niiden toimintaperiaate.



Kuva 10. Valmetin lämpölistat ja niiden toimintaperiaate [48].

Lauhdetta poistetaan kuivatussylinterin sisältä sifonin avulla. Sifoni poistaa lauhdetta sylinterin pohjalta paine-eron ja läpivirtaushöyrin avulla. Lauhteen määrä tulee aina pitää minimissä, jotta paperin kuivatus olisi mahdollisimman tehokasta. Sifoneita on olemassa kahta eri päätyyppiä: pyöriviä ja paikallaanpysyviä. Nimensä mukaisesti ne ovat joko kiinteästi kiinni sylinterin vaipassa pyörien sen mukana tai sitten ne pysyvät paikallaan sylinterin pyöriessä ympäri [48][47]. Kuvassa 11 on esitetty tyypillisimmät sifonityypit.



Kuva 11. Sifonityypit [48].

3.2.3 Kuivatusviira

Kuivatusviiran päätehtävänä on tasaisen, että tehokkaan kuivatuksen varmistaminen tukemalla paperirataa ja painamalla sitä kuivatussyylinteriä vasten. Kuivatusviiran avoimuus, rakenne ja kontakti paperin kanssa vaikuttavat kuivatusprosessiin. Kuivatusviiran läpivirtaavuus ja rakenne vaikuttavat myös suoraan kuivatustehoon. Kuivatusviiran kireyden aiheuttama paine ja sen pintarakenne vaikuttavat myös lämmönsiirtoon. Kuivatusviiralla onkin täten merkittävä rooli sylinterikuivatuksessa, koska se vaikuttaa paperiin tuotavan lämmön siirtoprosessiin sekä siitä poistuvan veden haihduttamiseen. Nykyisissä paperikoneissa viiran kireys on tyypillisesti luokkaa 1–4 kN/m [17]. Kuivatusviiran tulee myös pyörittää teloja ja sylintereitä, joissa ei ole omaa ohjausta. Hyviä piirteitä kuivatusviiralle ovat muun muassa kestävä rakenne, tasamittaisuus ja helppo puhdistettavuus [14]. Kuvassa 12 on esitetty esimerkki kuivatusviiran rakenteesta.



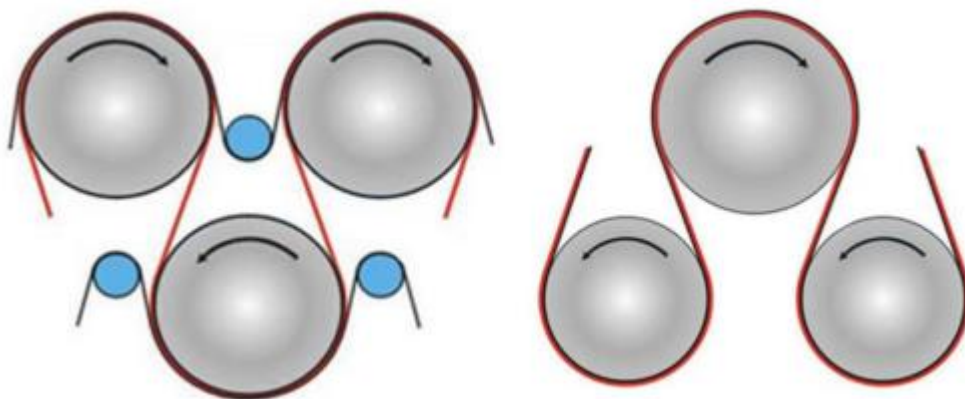
Kuva 12. TamStar kaksikerroksinen kuivatusviira [14].

3.2.4 Tyypillisimmät rakenneratkaisut

Sylinterikuivatusta hyödyntävä kuivatusosa koostuu yleensä noin 5–10 sylinteriryhmästä, jotka toimivat erillisinä yksiköinä. Jokaisella sylinteriryhmällä on siis omat viiraja käyttöjärjestelmät ja kuivatussylinterit voidaan järjestää usealla eri tavalla sylinteriryhmän sisällä. Yleisimpiä sylinterikuivatuksen rakenneratkaisuja ovat kaksi- ja yksiviiravienti [25].

Kaksiviiraviennissä kuivatussylinterit ovat kahdessa rivissä, jolloin kaikki sylinterit osallistuvat veden haihduttamiseen. Kaikkien sylintereiden osallistuminen haihdutukseen toimii kaksiviiraviennin etuna, mutta paperi kulkee kaksiviiraviennissä sylinteriltä sylinterille tukemattomana. Paperin huonon tuennan takia kaksiviiravientiä voidaan käyttää lähinnä vain pienillä konenopeuksilla ja kuivatusosan loppupäässä, jolloin paperi on jo kuivempaa ja kestää paremmin. Kaksiviiravientiä voidaan pitää jo perinteisenä menetelmänä, koska sen toimintaperiaate on säilynyt samanlaisena jo yli 150 vuotta [25].

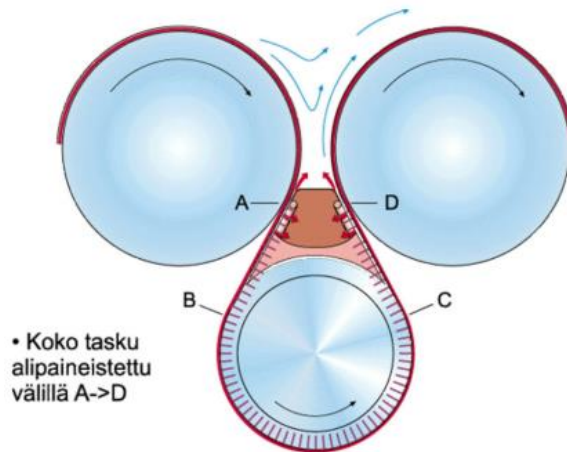
Kaksiviiraviennissä rupesi esiintymään ajettavuusongelmia, kun paperikoneiden pyörimisnopeudet kasvoivat vuosien saatossa. Ongelmia esiintyi eritoten kuivatusosan alkupäässä, jossa paperirata on vielä kosteampaa ja kestää huonommin kasassa. Näitä ajettavuusongelmia varten kehitettiin yksiviiravienti, jonka avulla ajettavuusongelmat saatiin korjattua ja konenopeudet saatiin kasvamaan. Yksiviiraviennissä rata on tuettu koko matkalta, jonka ansiosta lähes kaikki radan katkot on saatu estettyä [25] [33]. Kaksi- ja yksiviiraviennin toimintaperiaatteet on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Kaksi- (vasen) ja yksiviiraviennin (oikea) toimintaperiaatteet [27].

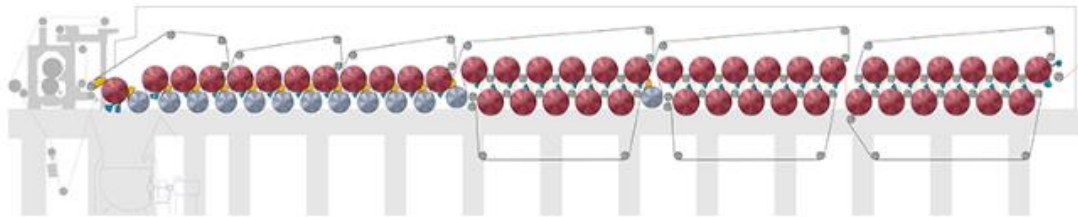
Nykyisessä yksiviiraviennissä alarivin kuivatussylinterit ovat korvattu imuteloilla (VAC-telat), jotta ajettavuutta on saatu parannettua ja täten koneen nopeutta kasvatettua. Imutelojen käyttö parantaa ajettavuutta varmistamalla paremman paperin ja viiran välisen

kontaktin [25]. Yksiviiraviennissä paperirata saadaan pysymään paremmin kiinni viirassa myös luomalla alipaine puhallus- tai imulaatikoiden avulla. Ylä- ja alarivin väliin jäävän tilan alipaineistamisella paperirata saadaan pysymään paremmin kiinni viirassa kuivatussylinterin ja imutelan välillä [33]. Kuvassa 14 on esitetty yksiviiraviennin toiminta puhalluslaatikon kanssa.



Kuva 14. Puhalluslaatikollinen yksiviiravienti [33].

Kuivatusosa voikin sisältää kaksi- tai yksiviiraviennillä olevia sylinteriryhmiä tai kumpia-kin näistä. Tyypillisesti kuivatusosan määrässä päässä käytetään yksiviiravientiä paremman ajettavuuden takaamiseksi ja kuivemmassa päässä kuivatusosaa vaihdetaan kaksiviiravientiin [25]. Kuvassa 15 on esitetty molempia viiravientitapoja sisältävä hybridi kuivatusosa.



Kuva 15. Hybridi kuivatusosa [34].

3.2.5 Kaavari

Kaavarointi on yksinkertainen paperin tekemisessä avustava prosessi, jonka avulla voidaan parantaa paperikoneen ajettavuutta ja vähentää sen veden kulutusta. Oikeanlaisen kaavaroinnin avulla voidaan myös saavuttaa turvallisemmat olosuhteet ja säästää energiaa [13].

Kaapimen rakenne koostuu kaavinpalkista, terän pidikkeestä, terästä ja sen kuormitus- sekä kevennyslaitteista, laakereista, suihkuputkista, oskillointi- ja apulaitejärjestelmistä. Kaavaroinnilla on kolme päätehtävää paperikoneessa: paperirainan pudottaminen katkojen ja päänniennin aikaan, veden ja epäpuhtauksien poistaminen kuivatussylinlerin pinnasta ja pehmopaperikoneilla kreppaaminen [13].

4. HUOMIOITAVAT STANDARDIT JA OMINAISUUDET

Paperikoneen telat suunnitellaan ja valmistetaan todella tiukkojen vaatimusten alla. Telat painavat pääsääntöisesti useita kymmeniä tonneja ja voivat olla pituudeltaan yli 11 m pitkiä sekä niiden täytyy pyöriä jopa 2000 m/min vauhdilla. Suunnitteluvaiheessa telalle asetetaan toleranssit, joiden mukaan telat valmistetaan ja valmistuksessa vaaditaan erityistä tarkkuutta, jotta näihin annettuihin toleransseihin päästään. Tällöin tela toimii halutulla tavalla paperikoneessa ja ei aiheuta ongelmatilanteita kuten värinää tai laatupoikkeamia. Nämä samat vaatimukset koskevat myös teräksistä kuivatussylinteriä ja niiden kanssa täytyy ottaa huomioon myös lisäksi painelaitteita koskevat standardit.

4.1 Paineraitestandardit

Paineraitteisiin lukeutuvat kaikki laitteet ja säiliöt, joissa esiintyy ylipainetta. Esimerkiksi putkistot ja painesäiliöt ovat paineraitteita. Paineraitteisiin liittyy huomattavan suuria riskejä ja onnettomuuden sattuessa vahingot voivat olla valtavia. Paineraitestandardeilla varmistetaan paineraitteiden turvallinen käyttö läpi niiden eliniän. Paineraitteille asetettavia vaatimuksia ohjataan Suomessa paineraittelailalla [35].

Teräksisiä kuivatussylintereitä suunniteltaessa ja valmistettaessa täytyy ottaa huomioon erilaisia paineraitestandardeja riippuen sylinterin tulevasta kohdemaasta. Euroopassa on käytössä PED (Pressure Equipment Directive), joka ohjaa kansallisia lainsäädäntöjä. Muita terässylinterien kanssa huomioitavia paineraitestandardeja ovat ASME (American Society of Mechanical Engineers) ja kiinalainen standardi GB 150. Tässä tutkimuksessa keskitytään tutkimaan rakennetta ottaen huomioon PED ja ASME standardit. Kiinalainen GB 150-standardi rajattiin tämän työn ulkopuolelle työn alussa, koska työssä lujuuslaskentaan käytetyt työkalut eivät olleet valmiita Kiina-standardin osalta.

Palvian tekemässä kandidaatintyössä todetaan [37], että ASME ja PED asettavat samankaltaiset perusvaatimukset hitsaukselle. Perttula taas toteaa diplomityössään [39], että terässylinterien valmistamisen kannalta ASME:n asettamat standardit ovat selkeästi tiukempia, kuin PED:n asettamat standardit. Tämä johtuu siitä, että ASME:n mukaan hitsauksen hoitavan yrityksen täytyy omata ASME:n vaatima sertifikaatti.

4.1.1 PED

Vuonna 2016 voimaan tullut painelaitedirektiivi (2014/68/EU) koskettaa kaikkia painelaitteita, joiden suurin sallittu paine ylittää 0,5 bar rajan. Kun painelaite täyttää painelaitedirektiivin asettamat vaatimukset, se CE-merkitään, jolloin laite on pätevä EU/ETA alueen markkinoille ja se voidaan ottaa käyttöön. EU:n painelaitedirektiivi takaa painelaitteiden yhdenmukaisuuden ja niiden helpottaa niiden liikkuvuutta Euroopan sisällä varmistuen samalla niiden turvallisuuden [36][42].

Painelaitedirektiivissä painelaitteet numeroidaan vaaraluokituksen mukaan välille 1–4, siten että luokka 1 on pienin vaaraluokka ja luokka 4 on vaativimmille painelaitteille. Painelaitteen vaaraluokka määräytyy painelaitedirektiivin 2. liitteessä olevista taulukoista, joita on yhteensä 9 kappaletta erilaisille painelaitteille [36][12]. Painelaitteiden luokitukseen vaikuttavat:

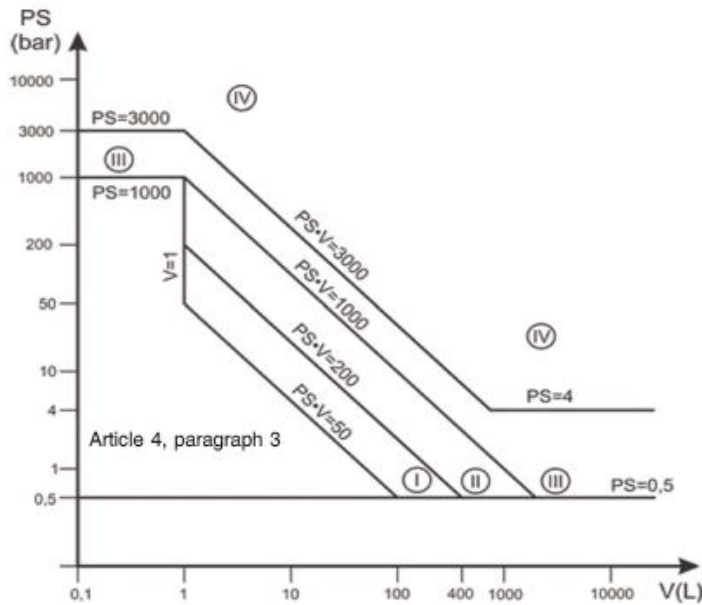
1. Painelaitteen tyyppi (säiliö, putkisto, ...)
2. Sisällön olomuoto (kaasu vai neste)
3. Sisällön vaaraluokitus (ryhmä 1 vai ryhmä 2)
4. Suurimman sallitun käyttöpaineen (PS) ja tilavuuden (V) tai nimellisuuruuden (DN) suhde

Painelaitteen luokituksen perusteella painelaitteelle asetetaan arviointiin liittyviä menettelyjä, joita sen kohdalla täytyy noudattaa. Menettelyt on esitetty moduuleina ja niiden yhdistelminä ja ne ovat esitetty painelaitedirektiivin 3. liitteessä. Painelaitteen tuotantomuoto ja sen tilaajan vaatimukset voivat myös vaikuttaa moduulin valitsemiseen. Valmistaja voi halutessaan käyttää vaativamman painelaiteluokan moduuleita, mutta kevyemmän luokan suuntaan tämä ei onnistu [36][12]. Painelaiteluokkia vastaavat moduulit ovat esitetty kuvassa 16.

Luokka I:	Moduuli A	Sisäinen tuotannonvalvonta
Luokka II:	Moduuli A2	Sisäinen tuotannonvalvonta ja valvotut painelaitetarkastukset satunnaisin väliajoin
	Moduuli D1	Tuotantoprosessin laadunvarmistus
	Moduuli E1	Painelaitteiden lopputarkastuksen ja testauksen laadunvarmistus
Luokka III:	Moduulit B + D	EU-tyyppitarkastus – suunnittelutyyppi + Tuotantoprosessin laadunvarmistukseen perustuva tyyppimukaisuus
	Moduulit B + F	EU-tyyppitarkastus – suunnittelutyyppi + Painelaitteen tarkastukseen perustuva tyyppimukaisuus
	Moduulit B + E	EU-tyyppitarkastus – tuotantotyyppi + Painelaitteen laadunvarmistukseen perustuva tyyppimukaisuus
	Moduulit B + C2	EU-tyyppitarkastus – tuotantotyyppi + Sisäiseen tuotannonvalvontaan perustuva tyyppimukaisuus ja satunnaisin väliajoin suoritettavat valvotut painelaitetarkastukset
	Moduuli H	Täydelliseen laadunvarmistukseen perustuva vaatimustenmukaisuus
Luokka IV:	Moduulit B + D	EU-tyyppitarkastus – tuotantotyyppi + Tuotantoprosessin laadunvarmistukseen perustuva tyyppimukaisuus
	Moduulit B + F	EU-tyyppitarkastus – tuotantotyyppi + Painelaitteen tarkastukseen perustuva tyyppimukaisuus
	Moduuli G	Yksikkökohtaiseen tarkastukseen perustuva vaatimustenmukaisuus
	Moduuli H1	Täydelliseen laadunvarmistukseen ja suunnittelun tarkastukseen perustuva vaatimustenmukaisuus

Kuva 16. Painelaiteluokat ja moduulit [36].

Kiwa Inspecta on laatinut kaavion [41], jonka avulla voidaan helposti määrittää painelaiteluokka ja nähdä siihen kuuluvat moduulit. Kaaviota tutkimalla voidaan todeta, että kivi- ja metallin painelaiteluokka määritellään painelaitedirektiivin 2. liitteessä esitetyn taulukon 2 mukaan. Kyseinen taulukko on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Kuivatussylinterille sovellettava direktiivin mukainen painelaiteluokan määritystaulukko [12].

Kuivatussylinterit ovat vaativia painelaitteita ja niiden painelaiteluokka on tapauksesta riippuen joko 3 tai 4. Niiden suunnittelussa ja valmistuksessa on siis otettava huomioon kyseisten vaativien luokkien moduulit.

4.1.2 ASME

American Society of Mechanical Engineers (ASME) on vuonna 1880 perustettu voittoa tavoittelematon ammattijärjestö. ASME:n tuottamat standardit ja koodit toimivat pohjana tekniikan ratkaisuille ja pyrkivät lisäämään turvallisuutta. ASME onkin julkaissut yhteensä yli 550 standardia eri tekniikan alojen kesken [1][5]. Kuivatussylintereitä koskettaa ASME:n paineastandardi eli Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC). ASME BPVC on Euroopan ulkopuolella johtava kansainvälinen standardi, jonka mukaan paineastioita suunnitellaan ja valmistetaan. Se onkin otettu viralliseksi standardiksi yli sadassa eri maassa [5][6].

Yrityksellä täytyy olla ASME BPVC mukainen sertifikaatti, jotta se voi valmistaa tai koonpanna ASME leimalla varustettuja painelaitteita. ASME:n haettavat sertifikaatit on jaoteltu eri osioihin painelaitteen tyyppin mukaan. Teräksisen kuivatussylinterin valmistaminen vaatii ASME BPVC:n kohdasta 8 löytyvän U-leiman [8]. Suomessa ASME U-leimaan sertifioituja yrityksiä ei ole kuin 9 kappaletta, joista osa rajoitettuja tiettyjen valmistusvaiheiden esimerkiksi hitsauksen osalta [9].

4.2 Staattinen ja dynaaminen käyttäytyminen

Paperikoneen teloihin ja kuivatussylintereihin liittyy erilaisia staattisia ja dynaamisia ominaisuuksia, jotka täytyvät ottaa huomioon niiden suunnittelussa ja valmistuksessa. Telan staattisia ominaisuuksia voidaan mitata, kun se pyörii hyvin hitaalla nopeudella ja sen käyttäytyminen ei muutu ajonopeuden funktiona esimerkiksi, kun ajetaan paperikoneen ryömintänopeudella (50 m/min). Telan dynaamiset ominaisuudet tulevat esiin tätä suuremmilla pyörimisnopeuksilla. Telan dynaaminen käyttäytyminen tarkoittaa käytännössä telan tasapainoon ja dynaamiseen heittoon liittyviä seikkoja [24][40].

Paperikoneen teloja ja kuivatussylintereitä voidaan tarkastella homogeenisenä palkkina, jolla on useita ominaistajuuksia. Ilmiötä, jossa telan pyörimistaajuus kohtaa telan ominaistajuuden kanssa kutsutaan kriittiseksi nopeudeksi. Telan pyöriessä kriittisellä nopeudella värinä voi voimistua todella suureksi, jolloin telaan kohdistuu vaurioita [24][40]. Vuosikymmenten saatossa tapahtuneen paperikoneiden ajonopeuden nostamisen vuoksi, telojen ominaistajuuksia on jouduttu kasvattamaan, jotta kriittiset nopeudet voitaisiin välttää. Ominaistajuuden korottaminen vaatii joko telan jäykkyyden kasvattamista tai massan pienentämistä. Useimmiten ratkaisuna toimii jäykkyyden kasvattaminen suurentamalla telan halkaisijaa. Telan halkaisijan kasvattamisen ongelmaksi muodostuvatkin telan säteissuuntaiset muodonmuutokset eli kuorimuodonmuutokset [20]. Perttulan kertoo diplomityössään [39], että kuivatussylinderien kanssa voi jättää kriittiset nopeudet huomioimatta, koska niiden halkaisijat ovat jo valmiiksi niin suuria. Jos halkaisijaa taas kasvatetaan ja vaipan seinämänpaksuus pidetään samana, niin silloin telan jäykkyys laskee. Tässä tutkimuksessa kasvatetaan terässylinderien halkaisijaa vielä entisestään, joten kriittiset nopeudet voi jättää huomioimatta. Halkaisijan suurentaminen tuo ongelmia sylinterin dynaamiseen käyttäytymiseen, johon täytyykin kiinnittää enemmän huomiota.

4.2.1 Dynaaminen heitto

Telan säteissuunnassa tapahtuvaa liikettä kutsutaan heitoksi. Heitto voi olla staattista tai dynaamista ja se ilmaistaan useimmiten huipusta huippuun arvona (p-p), jossa se ilmaistaan maksimi ja minimiarvon erotuksena. Telan staattinen heitto voi johtua esimerkiksi telan pinnan muotovirheestä tai laakerin virheliikkeestä. Telan dynaamista heittoa aiheuttaa muun muassa telan epätasapaino ja taivutusjäykkyydsvaihtelu [24].

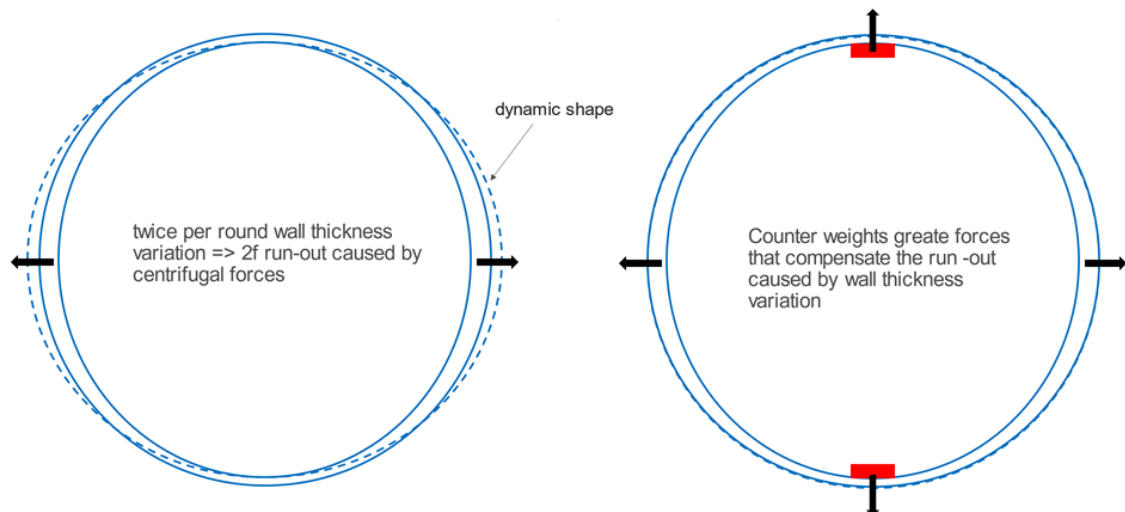
Toimeksiantajan entisen kehityspäällikön [51] mukaan, teräksisen kuivatussylinderin halkaisijaa kasvattaessa suurimmaksi haasteeksi tulee osoittautumaan sylinterin sisäreiän

soikeudesta johtuva taivutusjäykkyysvaihtelu, joka aiheuttaa dynaamista heittoa. Toimeksiantaja on pitänyt sallitun dynaamisen heiton toleranssina arvoa 0,3 mm, joka on todella tiukka ja haastava vaatimus jättikokoisille teloille ja sylintereille, jotka pyörivät paperikoneessa jopa 2000 m/min vauhdilla.

4.2.2 Taivutusjäykkyysvaihtelut

Forsberg kertoo putkiteloen kuorimuodonmuutoksien mallinnusta käsittelevässä diplomityössään [20], että telan poikkileikkauksessa epätasaisesti jakautuneen massan johdosta, poikkileikkaukseen muodostuu eri suuruiset pääjäyhdydet, jotka aiheuttavat taivutusjäykkyysvaihtelua. Epätasaisesti jakautunut massa telan poikkileikkauksessa johtuu yleensä vaipan seinämäpaksuuden vaihtelusta tai ympyrämuotoisuusrheestä. Taivutusjäykkyysvaihtelun aiheuttama virhe toistuu kahdesti jokaisella sylinterin pyörähdyksellä, jonka takia se onkin merkittävä tekijä dynaamisen heiton aiheuttajana [40][51].

Taivutusjäykkyysvaihtelua voidaan lieventää sylinterin sisäreiän sorvauksella ja sen jälkeen lisäämällä tasapainotuspainoja sylinterin lauhdelistoihin. Sisäreiän sorvaus on suhteellisen hidasta ja työlästä, mutta kuivatussynterien suuren halkaisijan vuoksi se on välttämätön toimenpide nopeilla paperi- ja kartonkikoneilla. Kuvassa 18 on havainnollistettu taivutusjäykkyysvaihtelun aiheuttamaa kahdesti pyörähdyksellä esiintyvää virhettä ja kuinka sitä voidaan korjata painoilla.



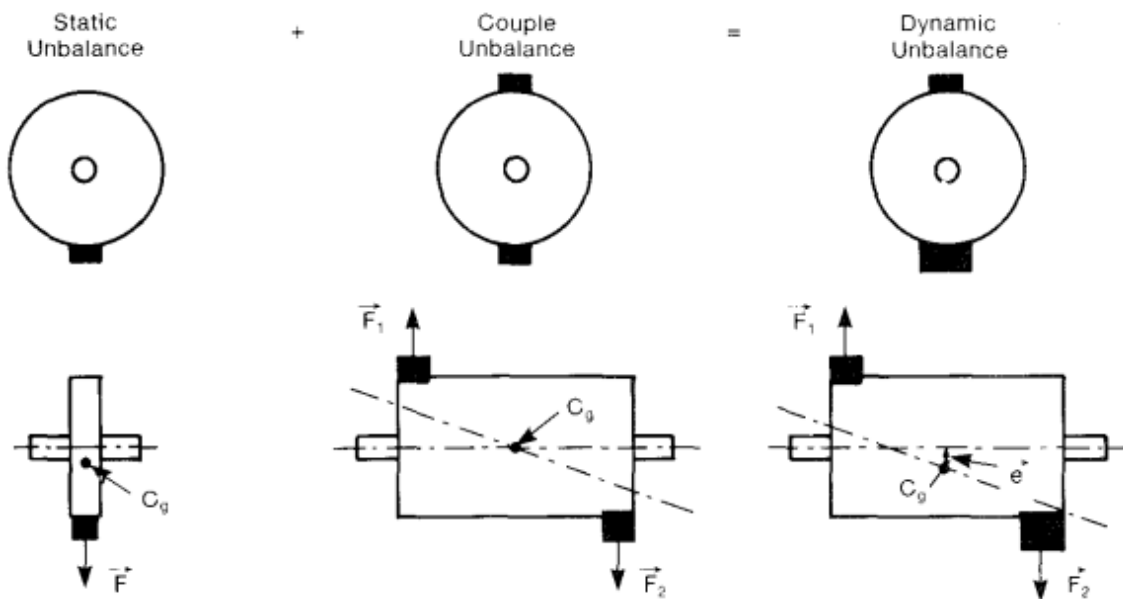
Kuva 18. Kaksi kertaa kierroksessa esiintyvä heitto ja sen korjaaminen [50].

Sylinterin epätasapainoa voidaan korjata tasapainottamalla painoja lisäten. Epätasapaino voi olla staattista, momenttista tai näiden yhdistelmää eli dynaamista. Staattinen

epätasapaino aiheutuu pistemassasta, joka on tietyllä säteellä pyörimisakselista. Staattisessa tapauksessa painopisteakseli ja pyörimisakseli ovat eri kohdissa, mutta ne ovat saman suuntaisia. Staattinen epätasapaino voidaan tasapainottaa asettamalla vastapaino 180° kulmaan samalle säteelle pistemassaan nähden [30].

Momenttiepätasapainossa on kaksi samansuuruista pistekuormaa 180° kulmassa toisistaan, mutta pituussuunnassa eripuolilla sylinteriä. Tällöin sylinteri on staattisesti tasapainossa, mutta pyöriessään kuormat aiheuttavat painopisteakselin kääntymisen, jolloin se kulkee pyörimisakselilla olevan painopisteen kautta, mutta ei ole yhdensuuntainen pyörimisakselin kanssa [30].

Dynaaminen epätasapaino on yhdistelmä staattista ja momenttista epätasapainoa. Se on myös kaikista yleisin epätasapainotyyppi, jota esiintyy teloissa ja sylintereissä. Dynaamista epätasapainoa voidaan korjata lisäämällä tasapainotuspainoja kahdelle eri tasolle [30]. Kuvassa 19 MacCamhaoil on havainnollistanut dynaamisen epätasapainon määritelmää.



Kuva 19. Dynaaminen epätasapaino [30].

5. TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT

Tässä luvussa käsitellään toimeksiantajan nykytilannetta teräksisten kuivatussyinterien suhteen, tehdään katsaus niiden nykyiseen rakenteeseen ja perehdytään jo tehtyihin tutkimuksiin. Tässä luvussa tutkitaan myös mahdollisia halkaisijan kasvattamisen vaatimia rakennemuutoksia ja arvioidaan isomman sylinterin valmistuskustannuksia.

5.1 Taustatietoa ja lähtötilanne

Kuten luvussa 3.2 mainittiin, kuivatussyinterit ovat valmistettu perinteisesti valuraudasta. Teräksiset kuivatussyinterit ovat alkaneet yleistymään viimevuosina. Toimeksiantajayritys on valmistanut muutamia terässylintereitä jo useita vuosikymmeniä sitten, mutta niiden tuotanto on varsinaisesti alkanut vasta vuonna 2017. Tämän jälkeen toimeksiantaja on valmistanut useita satoja teräksisiä kuivatussyintereitä, joita on toimitettu asiakkaille ympäri maailmaa. Teräksisten kuivatussyinterien päämitat ovat pysyneet lähestulkoon samana verrattaessa valurautaisiin edeltäjiinsä, poisluettuna vaipan paksuus. Lähes kaikki terässylinterit ovat valmistettu hitsattavilla suorilla päädyillä ja vaippa on sisäsorvattu. Taulukossa 1 on esitetty vuodesta 2017 eteenpäin valmistettujen terässylinterien oleellisia päämittoja ja -ominaisuuksia.

Taulukko 1. Terässylinterien päämitat ja -ominaisuudet

	Alue	Huomioita
Ulkohalkaisija (D_u)	1500–1830 mm	1500 ja 1830 mm yleisimmät
Vaipan paksuus (t_v)	22–30 mm	25 mm yleisin
Pituus (l_p)	2960–11700 mm	Tyypillisesti 5000–11000 mm
Suunnittelupaine (P_s)	5–11bar	Muutamia tapauksia <5bar ja >11bar
Suunnittelunopeus (v_s)	600–2000 m/min	Pääsääntöisesti ≥ 1000 m/min

Toimeksiantajalla on kuivatussyinterien tuotantoa Suomessa ja Kiinassa, mutta tällä hetkellä teräksisiä kuivatussyintereitä tehdään lähinnä Kiinassa. Työvaiheita myös alihankitaan tarvittaessa. Terässylintereitä toimitetaan ympäri maailmaa, joten niitä suunnitellaan eri painelaitestandardien vaatimusten mukaan. Pääsääntöisesti suurin osa terässylintereistä valmistetaan ASME:n tai PED:n mukaisesti.

5.2 Aikaisemmat tutkimukset ja patentit

Toimeksiantajan puolesta yli 1830 mm halkaisijaltaan olevia kuivatussyylintereitä on tutkittu muutamaan otteeseen, mutta niitä ei ole aloitettu valmistamaan. Samoin muiden valmistajien yli 1830 mm halkaisijaisista kuivatussyylintereistä löytyy jonkinlaista tietoa, mutta niiden yleistymisestä ei ole merkkejä. Tutkimuksen aikana löydettiin myös muutama oleellinen patentti liittyen tutkimuksen aiheeseen.

5.2.1 Aikaisemmat tutkimukset

Villgren on mitoittanut ja lujuuslaskenut insinööriyössään [57] onnistuneesti 2,2 m halkaisijaisen valuraudasta valmistetun kuivatussyylinterin jo vuonna 1992. Insinööriyössä oli tavoitteena saavuttaa paineluokat 5–11 bar samoilla kuivatussyylinterin rakenteen mitoilla. Kyseisessä työssä lujuuslasketun ja mitoitettun kuivatussyylinterin lähtöarvot olivat seuraavat:

- $D_u = 2200$ mm
- $P_s = 5 / 11$ bar
- $v_s = 2000$ m/min
- $l_v = 10500$ mm
- $F_v = 4$ kN/m

Villgrenin mukaan [57] insinööriyön tekemisen aikaan vuonna 1992 kilpailijoilla on jo ollut vastaavan kokoisia kuivatussyylintereitä käytössä. Villgrenin insinööriyön tuloksia ei kuitenkaan voida kuitenkaan suoraan hyödyntää tässä tutkimuksessa, koska tulokset on laskettu valuraudasta valmistetulle kuivatussyylinterille, joka omaa osittain erilaisen rakenteen ja erilaiset ominaisuudet.

Toimeksiantajan tietokannasta löytyy myös vuonna 2013 tehty lujuuslaskentaraaportti [19], jossa on laskettu teräksisen kuivatussyylinterin kestävyys seuraavilla lähtöarvoilla:

- $D_u = 2100$ mm
- $t_v = 20$ mm
- $t_p = 100$ mm
- $P_s = 5,2$ bar
- $v_s = 400$ m/min
- $l_v = 3800$ mm

- $F_v = 5 \text{ kN/m}$

Raportin tuloksena oli, että rakenne täyttää sen vaatimukset, vaikka päätyhitsien alueella oli lähellä sallittua rajaa koeponnistuspaineella. Koeponnistuksessa käytettävä paine on normaalisti 1,5–2 kertainen suunnittelupaineeseen verrattuna [43]. Kyseistä sylinteriä laskettaessa vaipan paksuutena oli käytetty arvoa 15 mm, jotta korrosio, hiomisvarat ja toleranssit tulevat otettua huomioon. Näiden seikkojen huomiointi on tärkeää lujuusmitoituksia tehdessä.

Tässä työssä kyseisen lujuuslaskennan tuloksista ei juuri hyödytä, koska tässä raportissa laskettu sylinteri on pituudeltaan niin lyhyt. Sen suunnittelupaine on myös kuivatussylintereissä käytettyjen höyrynpaineiden alimmasta päästä. Nämä mitat antavat kuitenkin suuntaa tässä työssä käytettäville lähtöarvoille.

5.2.2 Muiden valmistajien tarjonta

Tutkimuksen aikana löydettiin hieman erinäistä tietoa muiden valmistajien yli 1,83 m halkaisijaisista kuivatussylintereistä [31]. Tietoa löydettiin muun muassa vuonna 2022 käynnistetyistä toisen valmistajan valmistamista terässylintereistä. Kyseisiä sylintereitä oli toimitettu 6 kappaletta ja niiden rakenne vastaa toimeksiantajan teräksisten kuivatussylinterien rakennetta. Kyseisten sylintereiden mitat ovat seuraavanlaiset:

- $D_u = 2000 \text{ mm}$
- $t_v = 24 \text{ mm}$
- $t_p = 120 \text{ mm}$
- $P_s = 6,8 \text{ bar}$
- $v_s = 850 \text{ m/min}$
- $l_p = 4040 \text{ mm}$
- $F_v = 5 \text{ kN/m}$

Tämäkin terässylinteri on kooltaan suhteellisen pieni, joten varsinaisesti tuloksista ei hyödytä. Näissä terässylintereissä on kuitenkin mielenkiintoista se, että niiden päätyratkaisu on samanlainen kuin toimeksiantajalla, eli käytetään suoria päätyjä. Näiden sylintereiden päädyt ovat 20 mm paksummat kuin edellisessä luvussa tarkastellussa toimeksiantajan tekemässä lujuustarkastelussa, jossa päädyt olivat 100 mm paksuiset.

Tietoa löydettiin myös toisesta tapauksesta, jossa luultiin olevan 2100 mm halkaisijaltaan olevia toisen valmistajan valmistamia kuivatussylintereitä. Kävikin ilmi, että kuivatussylinterit olivatkin halkaisijaltaan 2202 mm. Kyseiseltä tehtaalta kysyttäessä saatiin selville, että kyseisessä koneessa on näitä kuivatussylintereitä 52 kappaletta ja että ne ovat tehty valuraudasta. Kyseisistä sylintereistä saatiin selvitettyä seuraavat mitat:

- $D_u = 2202$ mm
- $t_v = 36$ mm
- $P_s = 9,7$ bar
- $v_s = 1200$ m/min
- $l_v = 5800$ mm

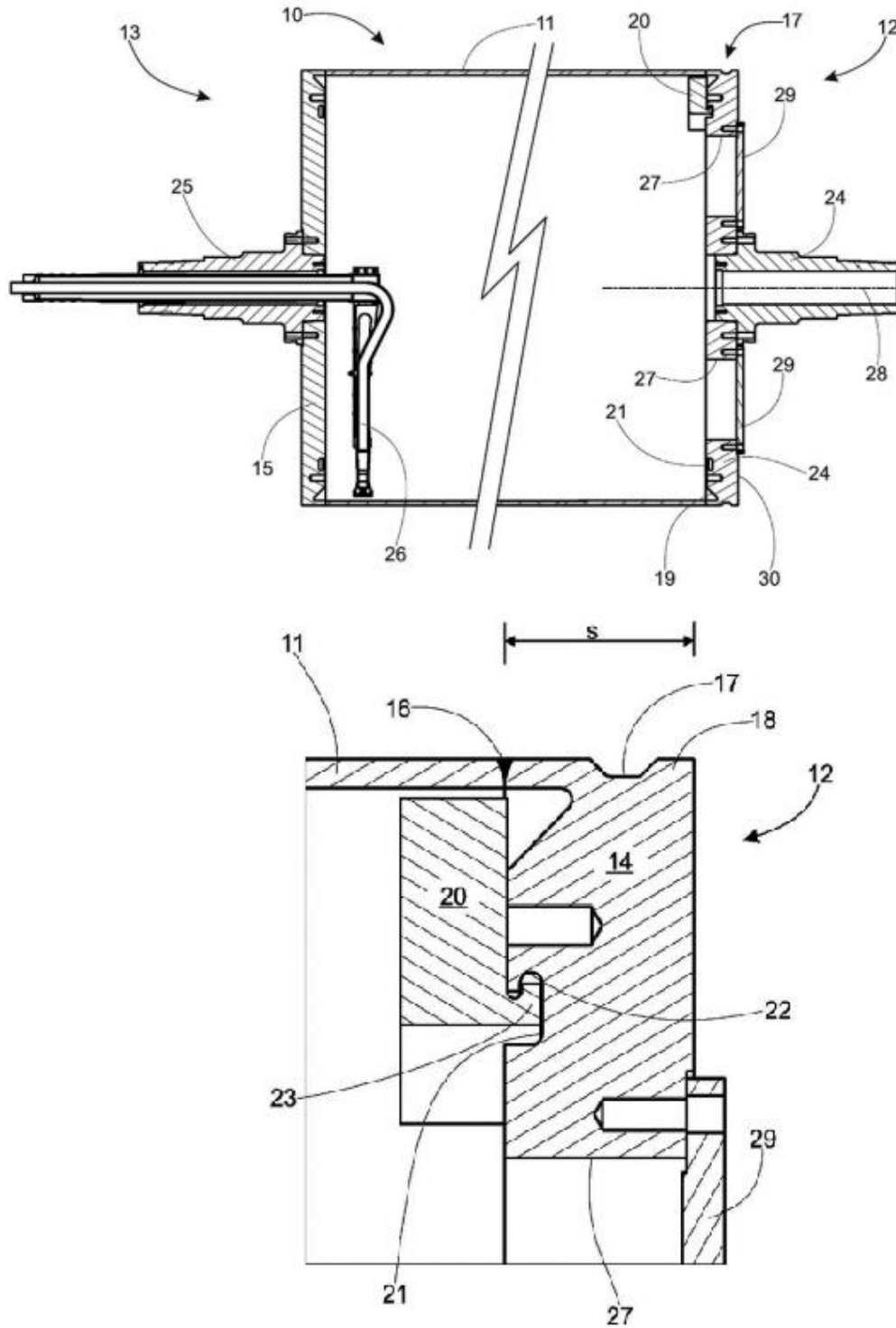
Kone, jossa kyseiset kuivatussylinterit sijaitsevat, on ollut käynnissä jo vuodesta 1996 lähtien ja kuivatussylintereissä ei ole ilmennyt ongelmia tänä aikana. Kyseiseltä tehtaalta kysyttäessä ainoa mainitsemisen arvoinen huomio kuivatussylintereihin liittyen oli se, että niiden ajaminen vaatii suurta tehoa. Varsinkin konetta käynnistäessä vaaditaan suurta tehoa, jotta isot sylinterit saadaan pyörimään nopeasti koneen suunnittelunopeudella.

Yli 1830 mm halkaisijaisia kuivatussylintereitä on siis valmistettu ja mitoitettu historiassa. Nämä 2202 mm halkaisijan omaavat valurautaiset kuivatussylinterit ovat pyörineet jo vuodesta 1996 ja Villgrenin vuonna 1992 tekemässä insinööriyössä kerrotaan, että kilpailijoilla on ollut käytössä jo tuohon aikaan vastaavan kokoisia kuivatussylintereitä. Kysymys jääkin ilmoille, että miksi suuremmat kuivatussylinterit eivät ole yleistyneet vuosien saatossa.

5.2.3 Patentit

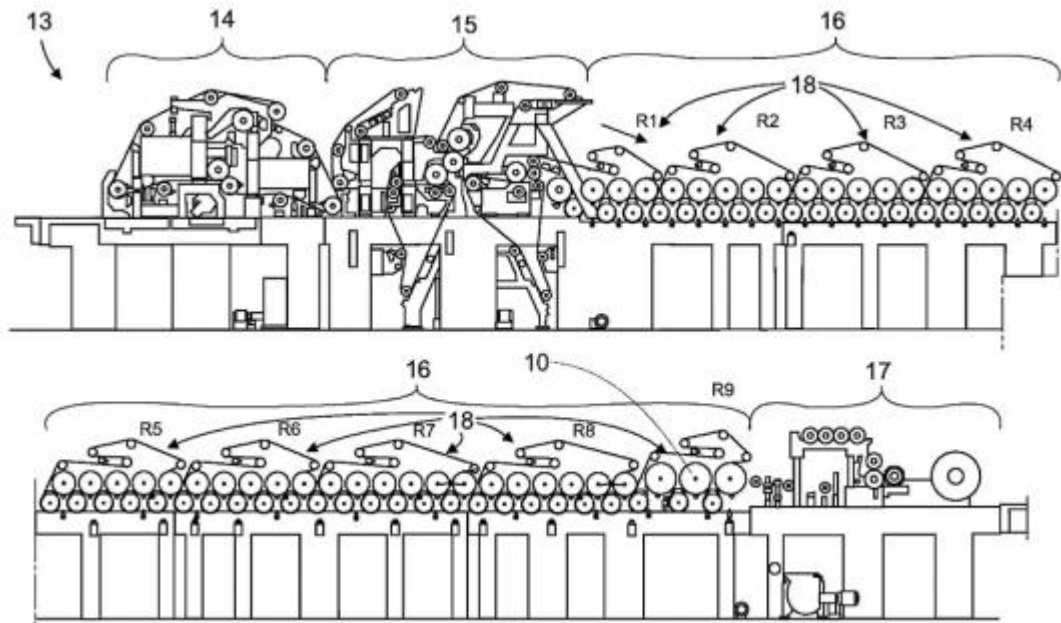
Päätyjen rakenne vaatii erityistä tarkkuutta teräksisten kuivatussylinterien suunnittelussa, jotta rakenne kestää ja täyttää standardien sille asettamat vaatimukset. Toimeksiantaja käyttää teräksisten kuivatussylinterien rakenteessa lähes poikkeuksetta suorita päätyjä, jotka hitsataan vaippaan kiinni. Toimeksiantaja onkin suojannut terässylinteriensä päätyrakenteen patentilla [23], jossa on määritelty, että köysipyörän ura (17) on tehty toiseen päätykappaleeseen (14) ja päätykappaleen (14, 15) paksuus on 110–150 mm, mutta mieluummin 125–145 mm. Päätykappaleeseen on myös tehty ura (22), johon voidaan kiinnittää tasapainoja (20). Patentissa on myös määritelty, että sylinterin toiseen

päätykappaleeseen sisältyy 2 tai 4 miesluukua (27), jotka on sijoitettu pyörähdysakseliin nähden symmetrisesti ja niissä on suorat kannet (29), jotka kiinnitetty päätykappaleen (14) ulkopintaan. Kuvassa 20 on patentissa esitetty rakenne, jossa on tässä kappaleessa ilmaantuvia numeroita vastaavat rakenteet.



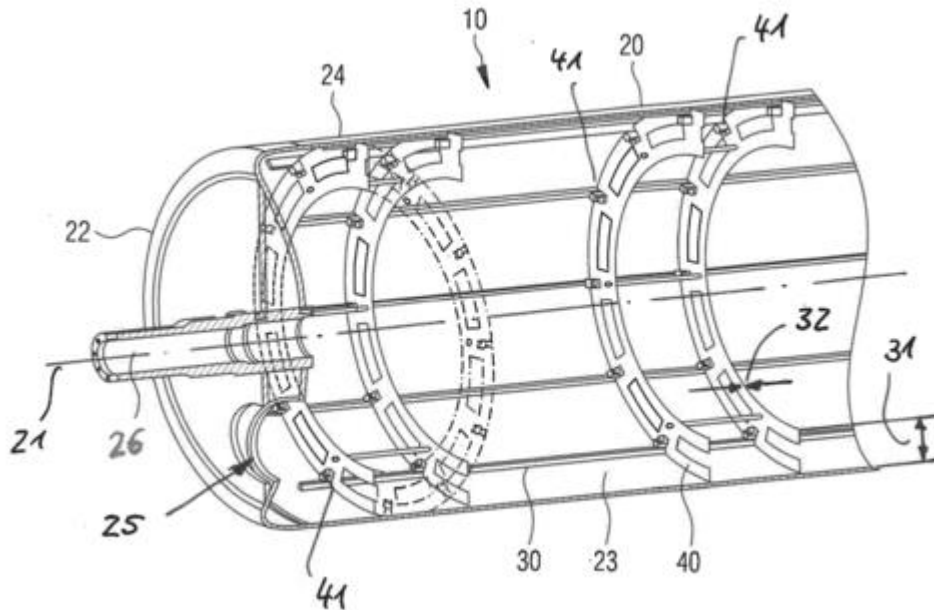
Kuva 20. Patentissa määritetty päätyrakenne [23].

Toimeksiantajalla on myös toinen patenti, joka suojaa teräksisen kuivatussylinderin halkaisijan kasvattamista [4]. Kyseisessä patentissa määritellään, että kuivatusosalla (16) voi olla ainakin yksi sylinteriryhmä (18), jossa teräksiset kuivatussylinderit (10) voivat olla halkaisijaltaan 1900–3000 mm. Patentti kattaa myös sen, että kaikki kuivatusosan sylinterit ovat suurikokoisia terässylintereitä. Patentissa on myös määritelty se, että teräksisen kuivatussylinderin päädyt ovat kiinnitetty vaippaan hitsiliitoksella. Kuvassa 21 on esitetty patentin tarkoitus ja numeroita vastaavat rakenteet.



Kuva 21. Patentissa määritetty kuivatusosan rakenne [4].

Toimeksiantaja on siis turvannut patenteilla tähän tutkimukseen liittyvät pääseikat, eli terässylinderin halkaisijan kasvattamisen ja sen päätyrakenteen. Tutkittaessa löytyi myös kilpailijan patenti [2], jossa kuivatussylinderin rakennetta on tuettu tukirenkailla, jolloin kuivatussylinderin seinämänpaksuutta voidaan tiputtaa ja näin parantaa lämmönsiirtoa. Kyseisessä patentissa on määritelty, että tukirenkaat (40) ovat maksimissaan 700 mm etäisyydellä toisistaan ja, että lämpölistat (30) ovat maksimissaan 250 mm päässä toisistaan kehämitalla. Patentissa on myös määritelty, että tukirenkaat ovat yli 20 mm paksuja ja mieluiten kuitenkin yli 30 mm paksuja. Patentin mukaan lämpölistojen jäyhyysmomentti on suurempi kuin 500 mm^4 . Kuvassa 22 on esitetty kilpailijan patentin idea ja numeroita vastaavat rakenteet.



Kuva 22. Kilpailijan jäykisterenkaisiin liittyvä patentti [2].

Samankaltaista tukirengasratkaisua on miettinyt muutamia vuosia sitten myös toimeksiantajan edustaja [51]. Tukirenkailla voitaisiin hallita dynaamista heittoa, joka voi muodostua ongelmaksi, jos kuivatussylinterin halkaisijaa kasvatetaan. Toisaalta tukirenkaiden asentaminen kuivatussylintereihin hankaloittaisi niiden valmistusprosessia huomattavasti, koska kuivatussylintereitä valmistetaan kerrallaan useita kymmeniä samaan koneeseen. Tästäkin syystä pyritään ratkaisuun, jossa dynaamista heittoa voidaan hallita muuten kuin tukirenkailla.

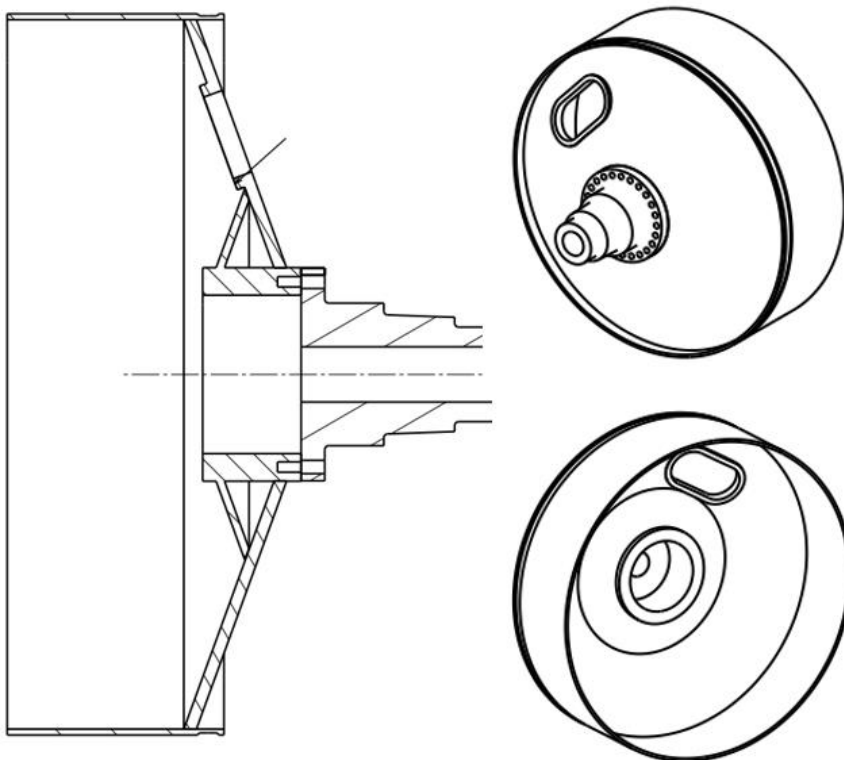
5.3 Päätyrakenne

Päätysten rakenne on todella oleellinen seikka teräksistä kuivatussylinteriä suunniteltaessa. ASME ja EN-standardit ohjailevat rakennetta ja päätysten täytyy täyttää niiden asetamat vaatimukset riippuen kuivatussylinterin kohdemaasta. ASME ja EN-standardit hyväksyvät suorien päätysten lisäksi myös kartiomaiset ja kalottimaiset päätyskappaleet. Toimeksiantaja on käyttänyt teräksisissä kuivatussylintereissä tähän asti suorita päätysiä, joissa ei ole käytetty vahvikkeita tai jäykisteitä. Toimeksiantajan pääsuunnittelijan [10] mukaan suorat päätys ovat valittu muun muassa niiden yksinkertaisuuden takia ja koska pyritään välttämään hitsaustarvetta päätyskappaleiden rakenteessa.

Tässä luvussa käydään läpi mahdollisia vaihtoehtoisia ratkaisuja teräksisen kuivatussylinterin päätyskappaleille. Luvussa tutustutaan myös muiden yritysten valmistamien terässylintereiden tunnettuihin päätysratkaisuihin.

5.3.1 Vaihtoehtoiset rakenneratkaisut

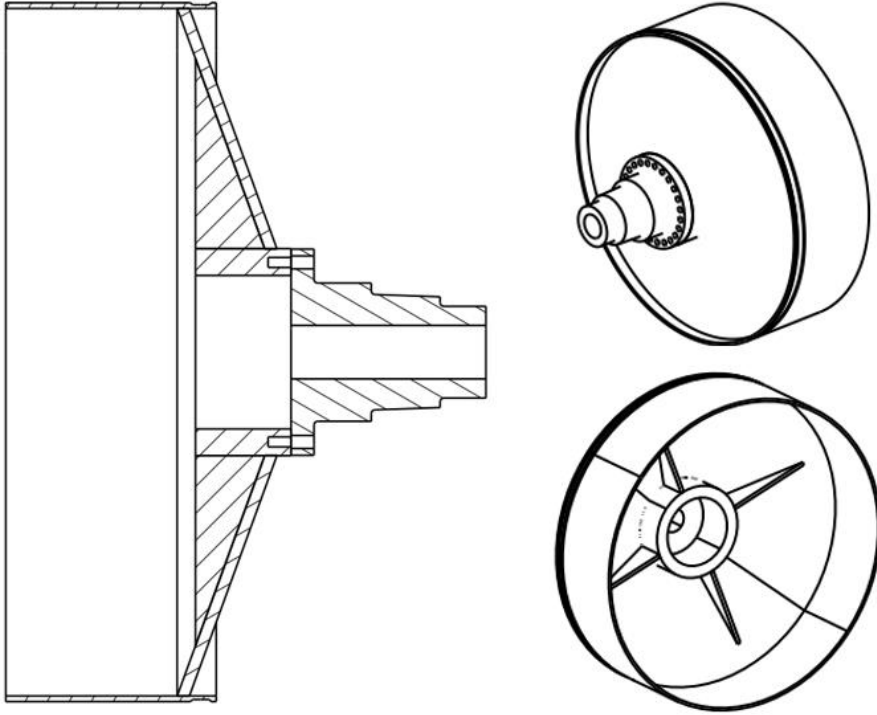
Suorat päädyt ilman jäykistelevyjä ovat toimineet toimeksiantajan terässylintereissä ongelmitta jo vuosikausia, mutta vaihtoehtoisia päätyrakenneratkaisuja on mietitty jo ennen terässylintereiden valmistamisen aloittamista. Toimeksiantajan tietokannasta löytyy hahmotelmia erilaisista rakenneratkaisuista. Kartiomaisia rakenteita on hahmoteltu kolmea erilaista, yksi suora pääty ja yksi kalottipääty. Kuvassa 23 on esitetty luonnos kartiorakenteesta A, joka tarkoitettu hitsattavaksi sylinterin vaipan sisälle.



Kuva 23. Kartiorakenne A.

Kartiorakenne A koostuu useasta osasta, jonka vuoksi päätyrakenteen valmistuksessa itsessään tarvittaisi hitsausta. Rakenteen täytyisi myös olla paksumpi miesluukun kohdalta, jotta se täyttää standardien vaatimukset. Kyseissä rakenteessa on myös vahvikkeeksi hitsattu kartio rakenteen sisäpuolella.

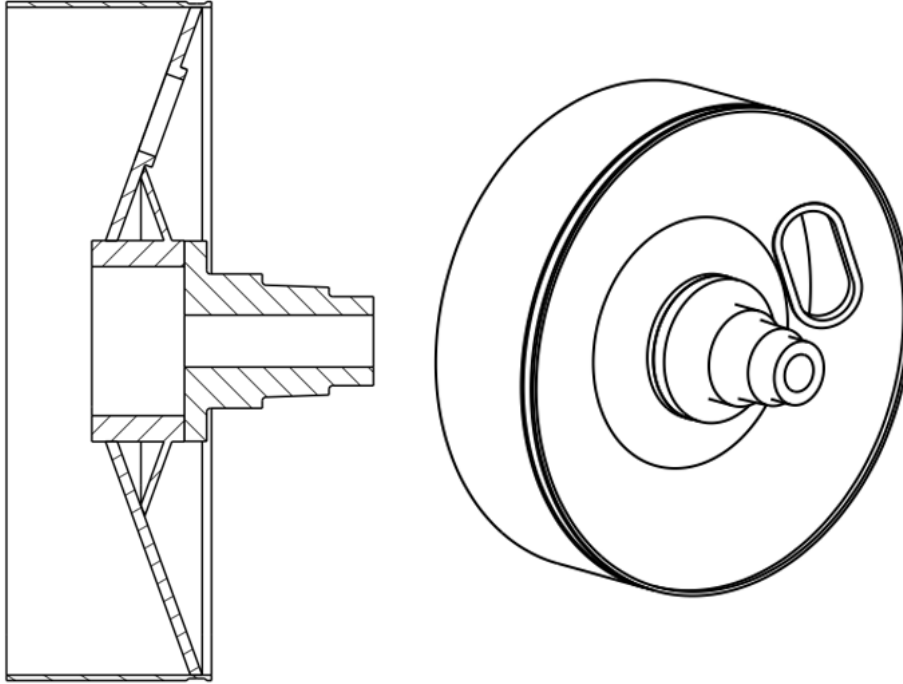
Kartiorakenne B on hahmoteltu samankaltaiseksi kuin kartiorakenne A, mutta siihen ei ole hahmoteltu miesluukun aukkoa ollenkaan, joka vaaditaan hoitopään puoleiseen päätyrakenteeseen. Kartiorakenne B on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Kartiorakenne B

Kartiorakenne B on myös tarkoitettu hitsattavaksi sylinterivaipan sisälle ja kuten kartiorakenne A, se koostuu useasta eri osasta. B rakenteen vahvikkeet ovat kuitenkin siipimäiset, eivätkä kartiomaiset kuten rakenteella A. Kartiorakenteet A ja B ovat molemmat koveria kuivatussylinterin sisäpuolelta.

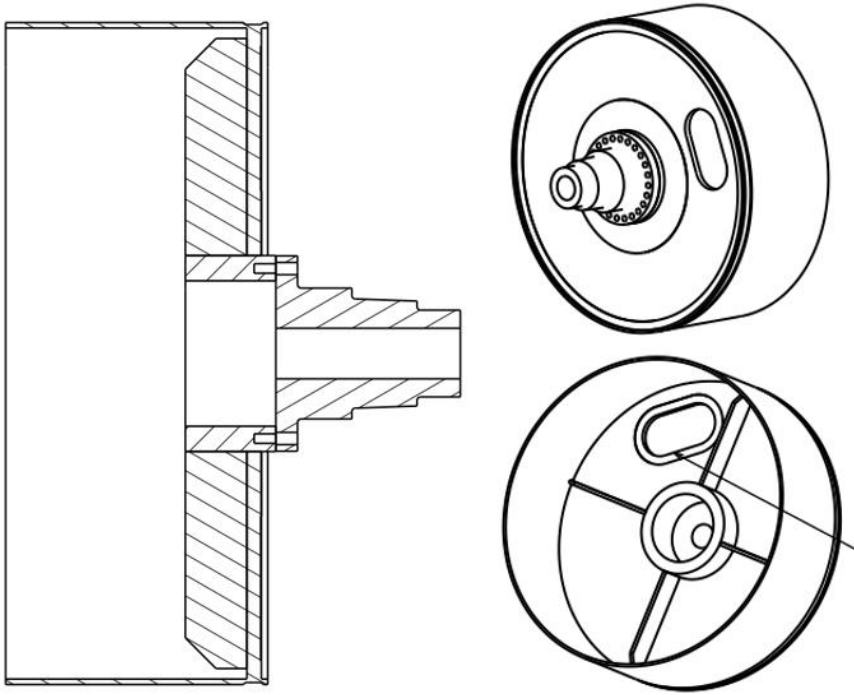
Kartiorakenne C on hahmoteltu kuperaksi kuivatussylinterin sisäpuolelta, jolloin sen rakennetta koskevat eri kohdat paineastiastandardista kuin A tai B rakennetta. Kartiorakenne C on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Kartiorakenne C.

Kartiorakenne C on lähes identtinen A rakenteen kanssa, mutta siinä vahvikekartio on kuivatussylinterin ulkopuolella ja rakenne on itsessään kupera eri suuntaan. Kyseisessä ratkaisussa on siis myös hitsausta vaativia toimenpiteitä ja useita eri osia. Rakenne C on myös tarkoitettu hitsattavaksi sylinterivaipan sisäpuolelle.

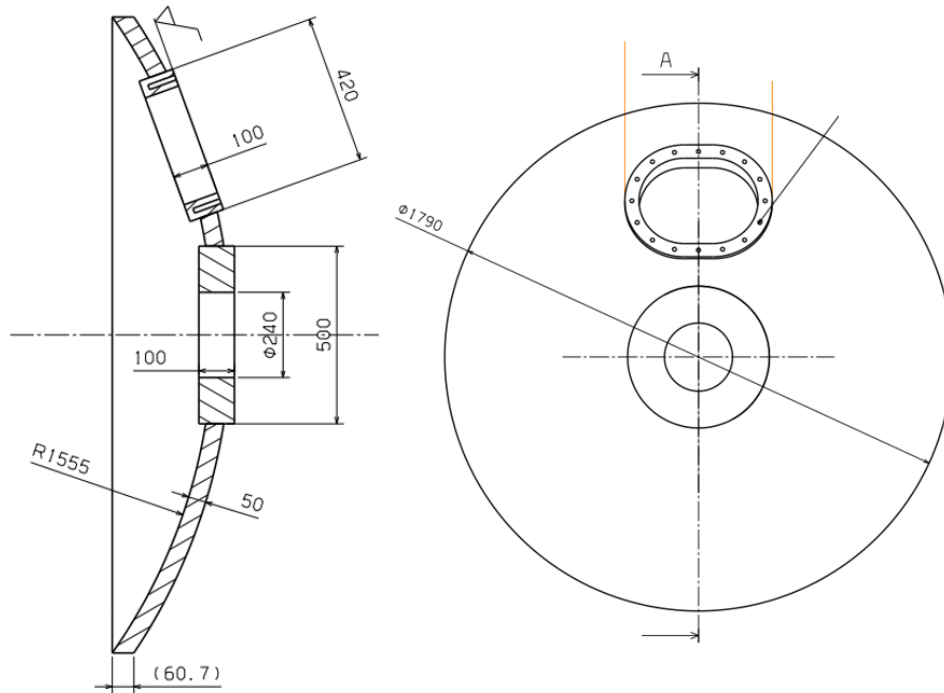
Tietokannasta löytyi myös suoran päädyn hahmotelma, jonka rakenne ei kuitenkaan vastaa nykyistä käytössä olevaa päätyrakennetta. Suoran päädyn luonnos on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. Suoran rakenteen luonnos.

Kyseinen suora päätyrakenne on myös suunniteltu hitsattavaksi vaipan sisälle. Kyseinen rakenne koostuu myös useasta eri osasta ja jäykistesiiivekkeistä. Jäykistesiiivekkeet ovat samankaltaiset kuin kartiorakenne B:ssä.

Tietokannasta löytyi myös kalottimaisen päätykappaleen luonnos, jonka rakenteen kanssa terässylinteristä oli pyydetty kehitysvaiheessa myös alustava tarjous alihankkijalta. Kalottipääty koostuu myös useasta osasta, joten sen kasaaminen vaatii hitsaamista ja pääty on tarkoitettu hitsattavaksi vaipan sisälle. Kalottipäädyn luonnos on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Kalottirakenteen luonnos

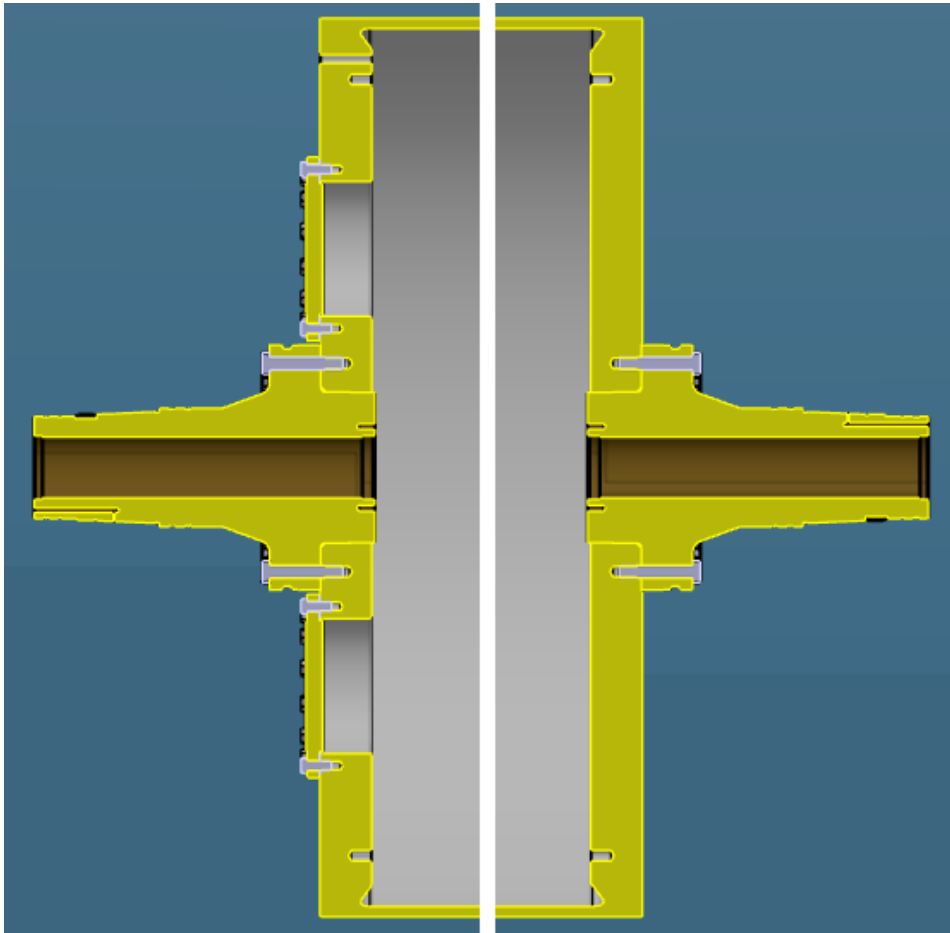
5.3.2 Muiden valmistajien rakenneratkaisut

Työn aikana tehtiin myös kartoitusta muiden valmistajien rakenneratkaisuista. Kilpailevien valmistajien rakenteita tutkittiin olemassa olevan tiedon valossa. Myös muiden valmistajien, kuten yhteistyökumppaneiden rakenneratkaisuista tehtiin katsausta. Tutkimuksessa todettiin, että pääasiallisilla kilpailijoilla on myös käytössä toimeksiantajan päätyrakennetta vastaava vahvikkeeton suora päätyrakenne, jossa on helpotusura, joka mahdollistaa suuremman kuivatusleveuden. Pääkilpailijoiden päätyrakenteet ovat myös vaipan päätyyn hitsattavia, kuten toimeksiantajankin päätyrakenne.

Muut valmistajat käyttävät siis myös suoria päätykappaleita. Osalla valmistajista päätykappaleissa on kuitenkin vahvikkeita tai jäykisteitä. Joissakin tapauksissa muut valmistajat käyttävät miesluukun reiän ja akselireiän ympärillä hitsattuja jäykisteitä. Tutkittaessa löydettiin myös erään toisen valmistajan rakenne, jossa oli käytetty hitsattuja siipimäisiä jäykisteitä suorassa päädyssä, kuten toimeksiantajan alkuperäisessä suoran päädyn luonnoksessa, joka esitettiin kuvassa 26.

5.3.3 Yhteenveto

Ennen vahvikkeettoman suoran päätyrakenteen valitsemista, toimeksiantajan toimesta on tutkittu erilaisia mahdollisia vaihtoehtoja. Erilaiset teräksestä valmistetut kartiomaiset ja kalottimaiset päädyt ovat hankalia mitoittaa ja valmistaa verrattuna vahvikkeettomaan suoraan päätyyn. Päätyjen rakenne on todettu parhaaksi, kun se voidaan valmistaa yhdestä levystä ilman, että siihen tarvitsee hitsata jäykisteitä tai muita osia. Täten rakenteen valmistus pysyy yksinkertaisena ja vakioituna. Kuvassa 28 on esitetty toimeksiantajan teräksisille kuivatussylinterille vakioima päätyrakenne.



Kuva 28. Toimeksiantajan terässylinterin päätyrakenne.

Päätykappaleet ovat valmistettu paksusta teräslevystä, jolloin miesluukkujen tai akselireikien alueita ei tarvitse vahvistaa ja materiaali voi olla yhtä paksua lähes koko kappaleen matkalla. Kuten kaikissa luonnoksissa ja muiden valmistajien tuotteissa, toimeksiantajan ratkaisussa akselit ovat kiinnitetty pultiliitoksella päätykappaleeseen kiinni, jotta akseli olisi mahdollisimman helposti vaihdettavissa ilman, että tarvitsee uusia koko kuivatussylinterin päätyä. Osassa muiden valmistajien ratkaisuisissa miesluukun ympärille

on hitsattu vahvikerengas, joka toimii samalla tasapainona miesluukun reiälle. Toimeksiantajan rakenteessa taas tehdään suoraan kaksi identtistä miesluukkua, jotta säästytään ylimääräiseltä hitsaamiselta ja luukun reiän tasapainotus saadaan hoidettua mahdollisimman helposti.

Valitun rakenteen yksinkertaisen ja kustannustehokkaan valmistuksen johdosta se on päätynyt vakioiduksi rakenteeksi. Kartiomaisia ja kalottimaisia päätykappaleita on käytössä valurautaisissa kuivatussylintereissä. Kartiomaiset ja kalottimaiset ratkaisut olisivat mahdollisia myös teräksisissä sylintereissä, mutta ne olisivat liian kalliita ja työläitä verrattuna vahvikkeettomaan suoraan päätyyn. Suoran rakenteen toimivuudesta kertoo myös se, että kaikilla pääkilpailijoilla on käytössä samankaltainen suora päätyrakenne. Suora päätyrakenne voidaankin tämän perusteella valita käytettäväksi rakenneratkaisuksi isommallakin terässylinteri kokoluokalla, jota tässä työssä tutkitaan. Rakenteen mittaamista täytyy tutkia FEM-analyysien avulla vaadittavia paineastiastandardeja noudattaen.

6. TERÄKSISEN KUIVATUSSYLINTERIN HALKAI-SIJAN KASVATTAMISEN VAATIMUKSET JA VAIKUTUKSET

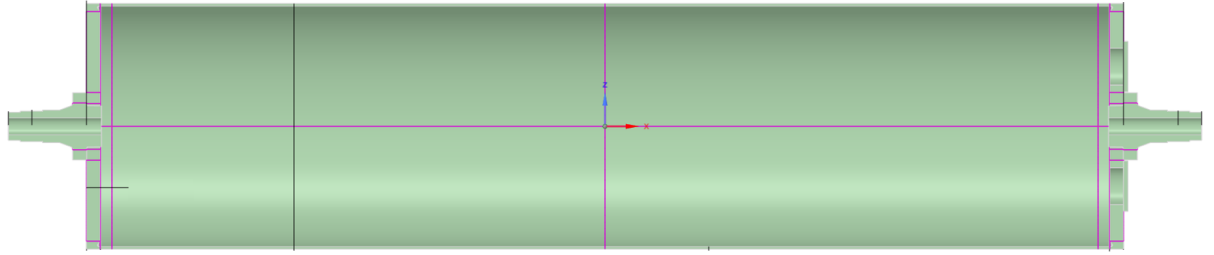
Tässä luvussa käydään läpi halkaisijan kasvattamisen vaikutuksia teräksisen kuivatus-sylinterin rakenteeseen. Rakenteen kestävyyttä analysoidaan FEM-laskennan avulla. Luvussa käydään läpi myös halkaisijan kasvattamisen vaikutuksia sylinterikuivatuksen tehoon. Referenssikuivatusosaa simuloidaan toimeksiantajan tarjoamalla sovelluksella, jonka avulla voidaan vertailla halkaisijan vaikutusta kuivatustehoon.

6.1 Rakenteen FEM-analyysi

Elementtimenetelmä eli Finite Element Method (FEM) on numeerinen ratkaisumene-telmä, jonka avulla voidaan optimoida rakenteen muotoa ja tarkastella rakenteen kestä-vyyttä [18]. Teräksisten kuivatussylinderien FEM-analyysiä varten on toimeksiantajan toi-mesta kehitetty valmis laskentaohjelma, jonka avulla voidaan tarkastella terässylinderien kestävyyttä ja elinikää ottaen huomioon eri paineastiastandardit. Laskentaohjelma käyt-tää avukseen pääasiassa Ansys-lujuuslaskentaohjelman työkaluja ja Microsoft Excelliä.

6.1.1 Laskentaohjelman toimintaperiaate

Laskentaohjelmaan syötetään halutut sylinterin mitat, jolloin ohjelma luo terässylinderin geometrian Ansys-ohjelman SpaceClaim työkalun avulla. Geometrian luomiseen tarvi-taan vaipan, päätykappaleiden ja akseleiden mitat. Laskennassa käytetty terässylinderin geometria luodaan niin sanotusti kaulimena, eli tilanteessa, kun vaippaan on hitsattu päädyt kiinni ja akselit ovat paikallaan. Muut osat kuten lauhdelistat, sifoni ja höyrykytkin jätetään pois tarkasteltavasta geometriasta. Laskentaohjelma on tehty suoralle päätyra-kenteelle valmiiksi eli jos päädyn rakennetta täytyisi vahvistaa esimerkiksi hitsattavilla jäykisteillä, laskentaohjelman antamat tulokset olisivat virheelliset ja lujuustarkastelu täy-tyisi suorittaa erikseen kyseiselle rakenteelle. Laskentaohjelman luoma geometria on esitetty ilman mittoja kuvassa 29.



Kuva 29. Laskentaohjelman luoma sylinterigeometria.

Laskentaohjelma tutkii rakenteen käyttäytymistä eri kuormitustapauksen mukaan. Nämä kuormitustapaukset ottavat huomioon erilaisia kuormituksia, joita terässylinteriin kohdistuu sen käytön aikana. Kuormitustapauksia ovat muun muassa koeponnistus ja kuormat, jotka sylinteriin kohdistuvat paperikoneen käydessä. Kuormitustapauksissa otetaan myös huomioon erilaisia sylinteriin kohdistuvia lämpökuormia. Laskentaohjelma laskee jännitykset kuormitustapausten vaatimilla arvoilla eri kohdissa sylinteriä. Laskentakohtia on useita erilaista, joista osa sijaitsee vaipan alueella ja osa itse päätyrakenteessa.

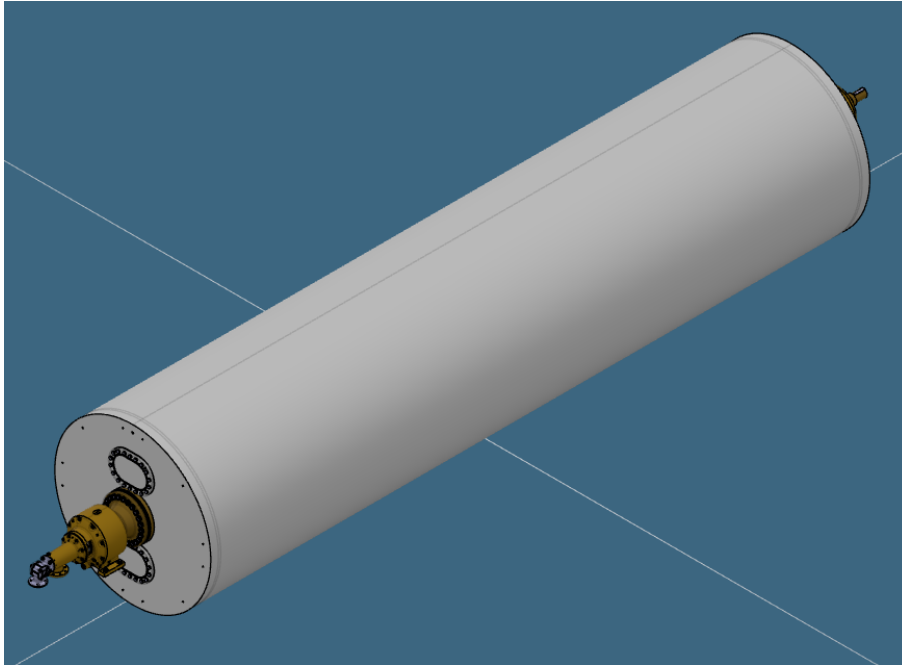
Laskentaohjelmasta valitaan, että suoritetaanko laskenta ASME vai EN-standardien mukaisesti. Tällöin laskentaohjelma ottaa huomioon valitun standardin asettamat vaatimukset ja näyttää laskennan tulokset valitun standardin rajoissa. Ihanteellinen tilanne olisi, jos rakenne olisi samoilla mitoilla hyväksyttävä molempien ASME ja EN-standardien rajoissa. Tällöin terässylinterin geometriaa ei tarvitsisi muuttaa erilaisiksi eri standardia vaativille projekteille, vaan rakenne voitaisi pitää vakiona.

6.1.2 Rakenteen FEM-analyysin tulokset

Työn aluksi sovittiin, että FEM-analyysi suoritetaan keskipituiselle ja maksihalkaisijaiselle terässylinterille. Suunnittelunopeutena ja -paineena sovittiin käytettäväksi varmuuden vuoksi suurimpia viitearvoja. Muuten rakenteen mitat pidettiin samana kuin edellisellä $D_u = 1830$ mm terässylinterillä. Laskennassa käytetyt lähtötiedot olivat seuraavanlaiset:

- $D_u = 2200$ mm
- $t_v = 25$ mm
- $P_s = 11$ bar
- $v_s = 2000$ m/min
- $l_p = 9300$ mm

Isomman kuivatussyylinterin rakennetta lähdettiin hahmottelemaan 3D-mallin avulla, jolloin nähtiin mittasuhteita vanhaan rakenteeseen nähden. 3D-mallin avulla hahmoteltiin myös erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja esimerkiksi laakerointiosille. Kuvassa 30 on esitetty terässylinterin 3D-malli.



Kuva 30. Teräksisen kuivatussyylinterin 3D-malli.

FEM-analyysit suoritettiin toimeksiantajan laskentaohjelmalla sekä lisäksi laskentaohjelmalla saadut tulokset varmennettiin tekemällä toinen perinteinen FEM-analyysi erillisen lujuuslaskentaan erikoistuneen työntekijän voimin. Tuloksien mukaan terässylinterin akselia jouduttiin kasvattamaan hieman, mutta muuten rakenne kestää kuormitukset hyvin ja ongelmia ei pitäisi ilmentyä. Korkeimmat jännitykset syntyvät vaipan ja päätykappaleiden väliseen hitsisaumaan lämpökuormien johdosta.

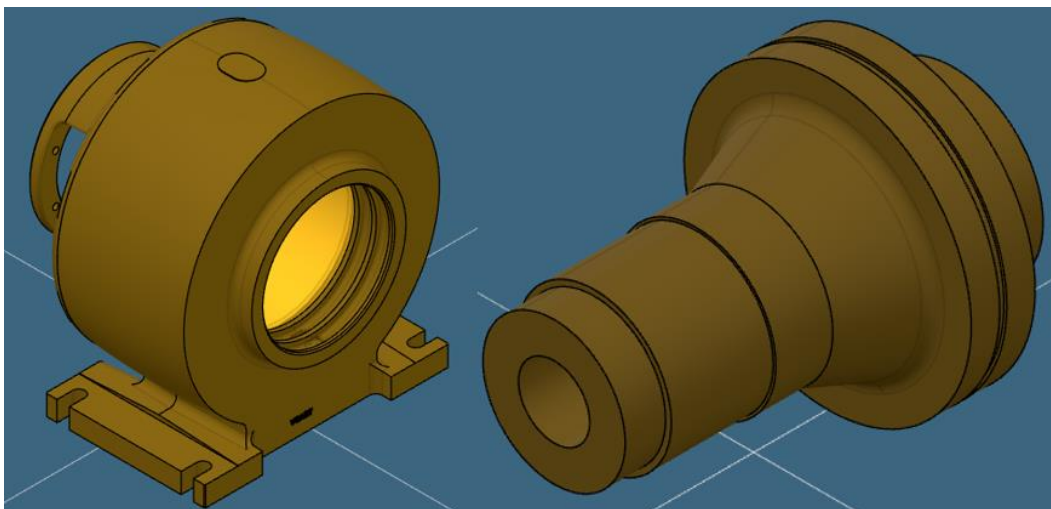
Tulokset laskettiin käyttäen PED:in määräämää EN 13445-3 standardia ja ASME:n BPVC Section VIII-standardia. Entisellä $D_u = 1830$ mm sylinterikoolla sama rakenne oli hyväksyttävä EN ja ASME-standardien mukaan. Nyt $D_u = 2200$ mm kokoluokalla FEM-analyysien mukaan akselia hieman suurentamalla sama rakenne on hyväksyttävä EN-standardin mukaan, mutta ASME vaatii päätykappaleesta paksumman. Täten työssä tarkastellaan kahta eri tuotemallia, joista toinen on EN-standardin mukainen ja toinen ASME-standardin mukainen, joissa rakenteen erona on pelkästään hieman paksempi pääty ASME:n mukaisessa mallissa.

6.2 Laakerointi

Aikaisemmin valmistetuissa teräksissä kuivatussylinterissä on käytetty maksimissaan 23152 kokoluokan pallomaisia rullalaakereita. Toimeksiantajalla on olemassa edellisille kuivatussylinterien kokoluokille laakerivalmistajan toimittamat laakerikuormataulukot, joista voidaan katsoa laakerikuorman, pyörimisnopeuden ja sylinterin lämpötilan avulla kuivatussylinterille oikeanlaiset kestävätkä laakerit. Laakereiden laskennallinen kestoikä tulisi olla kuivatussylinterillä reilu 20 vuotta.

Laakerikuormataulukon arvoja verrattaessa $D_u = 2200$ mm terässylinterin laskennallisiin arvoihin, huomattiin, että 23152 kokoluokan laakeri ei riitä, kun ison terässylinterin pituus lähenee maksimia $l_p = 11300$ mm, suunnittelunopeus on alhainen ja lämpötila on korkea. Tämä johtuu siitä, että pitkä ja iso terässylinteri painaa paljon ja laakerin voitelukalvo on huonompi pienen pyörimisnopeuden takia. Joten tietyissä tapauksissa voitaisiin joutua käyttämään isompaa laakerikokoa, joka on 23160. Isompaa laakerikokoa voitaisiin käyttää myös varmuuden vuoksi isoilla sylinterikokoluokilla, jotta välttäisiin työläitä ja kalliilta laakeriremonteilta. Täten isompi laakerikoko otetaan huomioon myös kustannuslaskennassa, vaikka se on laskennallisesti välttämätön vain murto-osalla mahdollisista tapauksista.

Suurempi laakeri tarkoittaa hieman kalliimpaa laakeria itsessään ja uusia laakerointiosia. Akselikaulan halkaisijaa täytyi myös kasvattaa uutta isompaa laakeria varten. Uusista laakerointiosista tehtiin alustavat hahmotelmat 3D-mallinnusohjelmalla ja niiden geometriaa optimoimalla niiden paino saatiin vastaamaan vanhan 23152 laakeroinnin vastaavia osia. Tällöin laakerointiosista ei tule lisäkustannuksia kuin itse isommasta laakerista ja akselikaulan suurentamisesta. Kuvassa 31 on esitetty alustavat 3D-mallit 23160 laakerin laakerointi osille ja akseliaihiolle.



Kuva 31. 23160 laakerin laakerointiosien hahmotelmat.

6.3 Isomman terässylinterin kuljettaminen

Kuivatussylinterit tuetaan vaipalta lovipuiden avulla kuljetuksen ajaksi. Tämä on mahdollista, koska kuivatussylintereihin ei tule koskaan pehmeää pinnoitetta, joka estäisi vaipalta tukemisen. Kuivatussylintereitä myös tulee koneeseen niin suuria määriä, joten esimerkiksi teräksisten kuljetuspukkien valmistaminen jokaiselle sylinterille erikseen olisi todella kallista. Kuivatussylinterit myös suojataan säältä ja kolhuilta suojapeitteiden ja lautamaton avulla. Kuvassa 32 on esitetty valmiiksi pakattu kuivatussylinteri.



Kuva 32. Pakattu kuivatussylinteri [28].

Kuivatussylinterit kuljetetaan tyypillisesti lopulliseen kohteeseensa rekalla, jos toimitus tapahtuu sisämaassa. Toimeksiantajan teräksiset kuivatussylinterit valmistetaan pääosin Kiinassa, josta niitä kuljetetaan useimmiten laivarahdilla satamaan lähelle toimituskohdetta, josta kuivatussylinterit siirretään rekalla lopulliseen kohteeseensa. Rekalla kuljetettaessa ei sylinterin halkaisijan kasvattamisen puolesta ole vaikutuksia, mutta laivarahtiin sillä on vaikutuksia, koska kuivatussylinterit pakataan merikontteihin laivakuljetuksen ajaksi. Laivarahtina kuljetettaessa kuivatussylinteri voidaan periaatteessa myös lastata Flat rackille tai break bulkina, eli irtotavarana. Nämä ovat kuivatussylintereiden kohdalla epäkannattavia kuljetusmuotoja kontteihin verrattuna johtuen kuivatussylintereiden suuresta valmistusvolyymista. Toimeksiantajan tietokantaan kerätty lista kuljetusmuodoista suositeltavuusjärjestyksessä [44]:

1. Umpikontti (DC) tai High Cube-umpikontti (HC)
2. Open Top-kontti (OT) tai High Cube Open Top-kontti (HCOT)
3. Flat Rack
4. Break Bulk

Käytettäviä kontteja on siis kahta erilaista: umpikontti ja open top-kontti sekä molemmista näistä korkeammat versiot. Umpikontit voidaan lastata laivassa päällekkäin, mutta open-top-kontteja ei, johtuen avautuvasta kattorakenteesta. Umpikontteihin lastaus tapahtuu oven kautta ja open top-konttiin voidaan lastata joko katon tai oviaukon kautta. Open top kontit ovat sisämitoiltaan hieman isompia kuin umpikontit. Kuvassa 44 on esitetty umpikontti ja open top-kontti.



Kuva 33. Umpikontti ja open top kontti [44].

Kuivatussylinteriä lastattaessa umpikonttiin täytyy siihen käyttää apuna erillistä lastauslaitetta, jolla kuivatussylinteri saadaan ujutettua konttiin sisään. Lastauslaitteen käyttö rajoittaa umpikonttiin mahtuvan kuivatussylinterin korkeutta, koska täytyy jättää tilaa kuivatussylinterin nostamiselle konttiin ja kontista pois. Kuivatussylinteri voidaan lastata Open top-konttiin katon kautta, jolloin lastauslaitteen vaatimaa nostotilaa ei tarvitse jättää kuivatussylinterin ja katon väliin. Open top kontissa rajoittavaksi tekijäksi nouseekin kattoaukon leveys isoimmilla sylinterihalkaisijoilla. Kuivatussylinteri voidaan myös lastata open top konttiin myös nosturilla oviaukon kautta, jolloin kattoaukko ei rajoita leveyttä.

Toimeksiantajan tietokannasta löytyvään ohjeistukseen [44] on kerätty rakenteen maksimi mittoja eri kuljetusmuodoittain. Näiden ohjemittojen perusteella voitiin tarkastella 3D-mallinnusohjelman piirtotyökalua hyväksikäyttäen eri halkaisijaisten kuivatussylinterien sopivuutta eri kontteihin. Kuivatussylinterin korkeuteen ja leveyteen vaikuttaa myös vaipan suojaksi asetettu lautamatto. Kuivatussylinterin korkeuteen vaikuttaa myös lovipuut, jotka tuovat lisäkorkeutta sylinterille. Taulukossa 2 on esitetty tulokset eri halkaisijoiden sopivuudesta eri kontteihin.

Taulukko 2. Teräksisen kuivatussylinterin sopivuus kontteihin halkaisijoittain.

	40' DC	40' HC	40' OT	40' HCOT
$D_u = 2000$ mm		X	X	X
$D_u = 2050$ mm		X	X	X
$D_u = 2100$ mm		X	X	X
$D_u = 2150$ mm		X	X*	X**
$D_u = 2200$ mm		X*		X**

*: Pienellä maavaralla, **: Oven kautta lastauslaitteella.

Tuloksista huomataan, että kaksi suurinta kokoluokkaa on ohjemittojen valossa mahdollista kuljettaa vain korkeammassa open top-kontissa siten, että kuivatussylinteri lastataan konttiin oven kautta. Tämä ei ole ongelma, koska kuivatussylinteri voidaan lastata oven kautta open top-kontteihin käyttäen hyväksi nosturia. Jos terässylinteri on maksimissaan $D_u = 2100$ mm, se mahtuu myös mahdollisesti korkeampaan open top-konttiin katon kautta. Myöskin $D_u = 2150$ mm kuivatussylinteri on mahdollista saada mahtumaan normaaliin open top-konttiin katon kautta, mutta maavara täytyy jättää suhteellisen pieneksi, joka altistaa kuivatussylinteriä vaurioille liikuteltaessa. Normaalin open top-kontin kattoaukko avautuu leveämmälle kuin korkeamman open top-kontin kattoaukko, jonka vuoksi $D_u = 2150$ mm kuivatussylinteri mahtuu normaaliin open top-konttiin katon kautta, mutta korkeampaan versioon vain oven kautta.

6.4 Kuivatussimuloinnit

Sylinterikuivatusta hyödyntävän kuivatusosan kuivatustehokkuutta voidaan määrittää esimerkiksi TAPPI-standardin avulla, jossa kuivatustehoa mitataan tunnin aikana haihtuneen veden määrällä kuivatuspinta-alaan nähden, eli yksikössä $\frac{kg}{h \cdot m^2}$. Kuivatustehoista on tehty kuvaajat höyryn lämpötilan funktiona eri paperilaaduille ja perinteisesti kuivatusosan kuivatusteho on määritetty tutkimalla näitä kuvaajia. Kuivatustehokuvaajia tutkimisen hyvänä puolena on tiedon ymmärtämisen helppous johtuen rajallisista lähtötiedoista. Kuvaajat ovat kuitenkin varsin epätarkkoja ja toinen tapa kuivatustehon määrittämiselle on kuivatusosan simulointi tietokoneella. Kuivatusosan simulointi onkin vakiintunut kuivatustehon mittaamiseen käytettynä työkaluna. Kuivatustehonsimuloinnin hyvinä puolina on lähtötietojen muuttamisen helppous ja tarkat tulokset [25].

Tämän työn kuivatussimuloinneissa käytettiin toimeksiantajan Qa PaperSim -simulointiohjelmää. Simuloinnissa tarkasteltiin referenssikuivatusosaa, joksi valittiin hyvin tyypillinen kartonkikoneen etukuivatusosa, jossa on käytössä yksiviiravienti. Alkuperäisessä referenssikuivatusosassa on käytössä 31 kappaletta $D_u = 1830$ mm teräksisiä kuivatussylintereitä ja 30 kappaletta $D_u = 1500$ mm VAC-teloja. Samaa kuivatusosaa simuloitiin vaihtamalla terässylinterien halkaisijaa välillä $D_u = 2000$ – 2200 mm pitäen muut arvot samoina kuin alkuperäisessä kuivatusosassa. Tällöin kuivatussylintereitä ja VAC-teloja vähentämällä kuivatusosa pystyttiin simuloimaan samaan nopeuteen ja loppukosteuteen kuin alkuperäinen kuivatusosa. Tällöin tulokseksi saatiin sylinterien ja VAC-telojen mahdolliset vähennykset sekä kuivatustehon parannukset eri halkaisijoilla. Vähennettyjen kuivatussylinterien ja VAC-telojen mukaan voitiin myös laskea kuivatusosan pituudenmuutokset halkaisijoittain. Kuivatussimulointien tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kuivatussimulointien tulokset.

Sylinterin halkaisija (D_u) mm	Sylinteri / VAC-tela vähennykset kpl	TAPPI-kuivatusteho $\frac{kg}{h \cdot m^2}$	Kuivatusosan pituudenmuutos %
1830	0 / 0	32,87	0
2000	3 / 3	33,25	+4,9
2050	4 / 4	33,77	+3,2
2100	4 / 4	33,87	+4,9
2150	5 / 5	33,51	+2,8
2200	6 / 6	33,79	+1,4

Tuloksista huomataan, että sylintereitä voidaan vähentää yhä enemmän halkaisijaa kasvattaessa ja vaadittavien kuivatussylinterien lukumäärä on sidonnainen niiden halkaisijaan. TAPPI-kuivatusteho taas nousee vain hieman, kun halkaisijaa kasvatetaan. Kuivatustehon vaihtelu on seurausta siitä, kuinka hyvin kyseinen kuivatussylinderikoko istuu alkuperäisen referenssikuivatusosan pituuteen ja geometriaan. Kuivatusteho on isomilla halkaisijoilla kuitenkin suurempi kuin alkuperäisellä halkaisijalla. Simuloinneissa huomattiin myös, että vaikka kuivatusosalta voidaan halkaisijaa kasvattaessa määrällisesti vähentää kuivatussylintereitä ja VAC-teloja, itse kuivatusosan pituus kasvaa hieman.

7. KUSTANNUSVERTAILUT

Tässä luvussa käydään läpi teräksisen kuivatussylinterin halkaisijan kasvattamisen vaikutuksia sen valmistuskustannuksiin sekä mahdollisia vaikutuksia rahtikustannuksiin. Luvussa tutkitaan myös minkälaisia investointitarpeita suurempien terässylinterien valmistamisen aloittaminen voisi aiheuttaa toimeksiantajalle. Luvussa käydään läpi myös halkaisijan kasvattamisen vaikutuksia kuivatusosan kustannuksiin. Työn julkisessa versiossa ei kerrota tarkkoja kustannuslukemia, koska ne ovat toimeksiantajan salassa pidettävää tietoa.

7.1 Valmistuskustannukset

Cost of Goods Sold (COGS) tarkoittaa välittömiä kustannuksia, jotka voidaan kohdistaa myytävälle tuotteelle. Näihin välittömiin kustannuksiin lukeutuu tuotteen materiaali- ja työkustannukset. Käytännössä COGS tarkoittaaakin siis tuotteen valmistuskustannuksia [11]. Ex Works (EXW) tarkoittaa järjestelyä, jossa tuotteen ostaja maksaa tuotteen toimituskulut [16]. Tässä kappaleessa teräksisen kuivatussylinterin valmistuskustannuksia lasketaan ja vertaillaan COGS EXW -muodossa, jolloin otetaan huomioon tuotteen valmistuskustannukset ja jätetään sisäisestä kuljetuksesta aiheutuvat kustannukset huomiotta.

Teräksisen kuivatussylinterin valmistuskustannuksien arvioinnissa käytettiin apuna toimeksiantajan kuivatussylintereille luomaa kustannusmallia. Työssä käytetty kuivatussylintereiden kustannusmalli on Excel-pohja, joka antaa arvion kuivatussylinterin materiaali- ja valmistuskustannuksista syötettyjen tietojen mukaan. Kustannusmalli on tarkoitettu jo olemassa oleville kokoluokille ($\max D_u = 1830$ mm), mutta halkaisijaksi siinä pystyy syöttämään kuitenkin suurempiakin kokoja. Suurempia halkaisijoita syötettäessä eivät kaikki toiminnot kuitenkaan toimi oikein ja kaikki kohdat jouduttiin tarkastamaan sekä muokkaamaan tarvittaessa. Muun muassa kustannusmalliin täytyi lisätä uusi akselikoko ja uusi laakerikoko. Työvaiheiden kestoajoja jouduttiin myös muokkaamaan. Toimeksiantajan edustajien [32][46] arviointien perusteella työvaiheiden kestoja lisättiin suhteessa halkaisijan kasvattamiseen. Näin suurempihalkaisijaiset sylinterikoot saatiin lisättyä kustannusmalliin ja pystyttiin arvioimaan niiden valmistuskustannuksia. Kustannukset arviointiin kahden eri tapauksen mukaan, joista ensimmäisessä vaippa ostetaan valmiina ali-hankkijalta ja toisessa tapauksessa vaippa valmistetaan itse.

7.1.1 Kustannusjakaumat

Materiaali- ja työkustannuksien jakautumista vertailtiin halkaisijoiden $D_u = 1830$ mm ja $D_u = 2200$ mm välillä. Kustannusjakaumavertailussa kuivatussylinterin pituutena käytettiin keskikokoa $l_p = 9300$ mm. Kustannusjakaumavertailussa lisäkulut ja suunnittelukulut jätettiin huomiotta. Huomattiin, että kustannukset jakaantuvat lähes samalla tavalla materiaali- ja työkustannuksien välille halkaisijoilla 1830 mm ja 2200 mm riippumatta kumpaa standardia käytetään. Materiaalikustannukset nousevat hieman valmistuskustannuksiin nähden, johtuen akselin ja päätykappaleiden suurentamisesta. Taulukossa 4 on esitetty materiaali- ja valmistuskustannuksien jakaantuminen halkaisijoiden välillä eri standardein vaippa alihankittuna ja itse valmistettuna.

Taulukko 4. Materiaali- ja valmistuskustannuksien jakaantuminen halkaisijoittain ja standardeittain (vaippa alihankittuna / itse valmistettuna).

	$D_u = 1830$ mm (EN/ASME)	$D_u = 2200$ mm (EN)	$D_u = 2200$ mm (ASME)
Materiaalikustannukset	73 % / 61 %	74 % / 62 %	74 % / 63 %
Valmistuskustannukset	27 % / 39 %	26 % / 38 %	26 % / 37 %

Itse materiaalikustannuksien jakaantuminen muuttui hieman halkaisijaa kasvattaessa. Päätykappaleiden ja akselin osuudet kasvoivat kustannuksissa hieman. Akselin suurentaminen kasvatti hieman sen osuutta jakaumassa EN-standardin mukaisella terässylinterillä, mutta tasoittui takaisin samaan lukemaan ASME-standardisella sylinterillä. Päätykappaleen kustannukset kohosivat muihin nähden halkaisijan kasvaessa ja vielä enemmän sitä paksunnettaessa ASME-standardin mukaiseksi. Vaipan kustannukset ovat edelleen molemmissa tapauksissa ylivoimaisesti isommat. Taulukossa 5 on esitetty materiaalikustannuksien jakaantuminen.

Taulukko 5. Materiaalikustannuksien jakaantuminen halkaisijoittain ja standardeittain (vaippa alihankittuna / itse valmistettuna).

	$D_u = 1830$ mm (EN&ASME)	$D_u = 2200$ mm (EN)	$D_u = 2200$ mm (ASME)
Vaippa	53 % / 46 %	52 % / 45 %	51 % / 44 %
Päätykappaleet	16 % / 19 %	20 % / 23 %	22 % / 25 %
Akselit	9 % / 10 %	10 % / 11 %	9 % / 11 %

Laakerointi	6 % / 7 %	5 % / 6 %	5 % / 6 %
Muut	16 % / 18 %	13 % / 15 %	13 % / 14 %

Työkustannuksien jakautuminen pysyi halkaisijan muuttuessa hyvin samanlaisena. Vaiipan ja päätykappaleiden lisääntynyt koneistusaika vähenti kokoonpanon osuutta hieinan. Taulukossa 6 on esitetty valmistuskustannusten jakautuminen.

Taulukko 6. Valmistuskustannusten jakautuminen halkaisijoittain ja standardeittain (vaiippa alihankittuna / itse valmistettuna).

	$D_u = 1830$ mm (EN&ASME)	$D_u = 2200$ mm (EN)	$D_u = 2200$ mm (ASME)
Vaiippa	15 % / 43 %	16 % / 43 %	16 % / 43 %
Päätykappaleet	11 % / 7 %	12 % / 8 %	12 % / 8 %
Akselit	8 % / 6 %	8 % / 6 %	8 % / 6 %
Kokoonpano	66 % / 44 %	64 % / 43 %	64 % / 43 %

Täten voidaan todeta, että halkaisijan kasvattaminen ei vaikuta merkittävästi materiaali- ja työkustannusten jakaantumiseen vaikkakin päätykappaleiden ja akselien materiaalikustannukset kasvavat. Isoin ero syntyy, kun verrataan ASME-standardin mukaan valmistettua $D_u = 2200$ mm terässylinteriä ja $D_u = 1830$ mm terässylinteriä. Voidaan myös olettaa, että kulut jakaantuvat samalla skaalalla myös halkaisijoiden 1830 mm ja 2200 mm välissä olevilla kokoluokilla.

7.1.2 Valmistuskustannuksien vertailu

Teräksisen kuivatussylinterin COGS EXW kustannuksia arvioitiin välillä $D_u = 2000 - 2200$ mm ja tuloksia vertailtiin nykyiseen maksimihalkaisijan $D_u = 1830$ mm sylinterikokoon. Kustannusvertailussa sylinterin pituutena käytettiin kolmea eri kokoluokkaa $l_p = 7250$ mm, 9300 mm ja 11300 mm. Kustannusvertailussa huomattiin, että valmistuskustannukset kasvavat hyvin lineaarisesti halkaisijaan nähden. Sylinterin pituus ei juurikaan vaikuta vertailutuloksiin. Taulukossa 7 on esitetty EN-standardin mukaan valmistetun te-

rässylinterin valmistuskustannuksien nousu 23152 laakerilla halkaisijan kasvaessa verrattuna aikaisemman sylinterikoon valmistuskustannuksiin vaippa alihankittuna ja itse valmistettuna.

Taulukko 7. Valmistuskustannuksien vertailu EN-standardin mukaisella pääty-paksuudella 23152 laakerilla halkaisijoittain (vaippa alihankittuna / vaippa itse valmistettuna).

	$D_u = 1830$ mm	$D_u = 2000$ mm	$D_u = 2050$ mm	$D_u = 2100$ mm	$D_u = 2150$ mm	$D_u = 2200$ mm
$l_p = 7250$ mm	- / -	+10,6 % / +9,9 %	+12,7 % / +11,8 %	+14,9 % / +13,7 %	+17,0 % / +15,7 %	+19,1 % / +17,6 %
$l_p = 9300$ mm	- / -	+10,5 % / +9,8 %	+12,7 % / +11,8 %	+14,9 % / +13,7 %	+17,0 % / +15,7 %	+19,2 % / +17,7 %
$l_p = 11300$ mm	- / -	+10,5 % / +9,8 %	+12,7 % / +11,8 %	+14,9 % / +13,8 %	+17,1 % / 15,8 %	+19,3 % / +17,8 %

Jos isommilla halkaisijoilla jouduttaisiin käyttämään 23160 kokoluokan laakereita, valmistuskustannukset kasvaisivat verrattuna nykyiseen maksimihalkaisijakokoon, jolla voidaan käyttää 23152 kokoluokan laakereita. Laakerikokoa kasvatettaessa lisäkuluja syntyy muun muassa itse isommasta laakerista ja akselikaulan suurentamisesta. Taulukossa 8 on esitetty vastaavat tulokset kuin edellä, mutta $D_u = 2000$ – 2200 mm kokojen kustannuksiin on lisätty 23160 kokoluokan laakerien tuomat lisäkulut.

Taulukko 8. Valmistuskustannuksien vertailu EN-standardin mukaisella pääty-paksuudella 23160 laakereilla halkaisijoittain (vaippa alihankittuna / vaippa itse valmistettuna).

	$D_u = 1830$ mm	$D_u = 2000$ mm	$D_u = 2050$ mm	$D_u = 2100$ mm	$D_u = 2150$ mm	$D_u = 2200$ mm
$l_p = 7250$ mm	- / -	+15,0 % / +13,9 %	+17,1 % / +15,8 %	+19,2 % / +17,7 %	+21,3 % / +19,7 %	+23,5 % / +21,7 %
$l_p = 9300$ mm	- / -	+14,4 % / +13,6 %	+16,6 % / +15,5 %	+18,7 % / +17,5 %	+20,9 % / +19,5 %	+23,1 % / +21,4 %
$l_p = 11300$ mm	- / -	+14,0 % / +13,3 %	+16,2 % / +15,2 %	+18,4 % / +17,2 %	+20,7 % / +19,2 %	+22,9 % / +21,3 %

Taulukoissa 7 ja 8 esitetyt valmistuskustannuserot laskettiin myös ASME-standardin mukaisille terässylinterille, joissa päätyä on paksunnettu ASME:n vaatimiin mittoihin. Taulukoissa 9 ja 10 on esitetty nämä ASME-standardin mukaisesti valmistettujen terässylinterien valmistuskustannuserot 23152 laakereilla ja 23160 laakereilla.

Taulukko 9. Valmistuskustannuksien vertailu ASME-standardin mukaisella päätypaksuudella 23152 laakerilla halkaisijoittain (vaippa alihankittuna / vaippa itse valmistettuna).

	$D_u = 1830$ mm	$D_u = 2000$ mm	$D_u = 2050$ mm	$D_u = 2100$ mm	$D_u = 2150$ mm	$D_u = 2200$ mm
$l_p = 7250$ mm	- / -	+11,8 % / +11,0 %	+14,0 % / +12,9 %	+16,1 % / +14,9 %	+19,7 % / +18,2 %	+22,0 % / +20,3 %
$l_p = 9300$ mm	- / -	+11,6 % / +10,8 %	+13,8 % / +12,8 %	+16,0 % / +14,9 %	+19,5 % / +18,1 %	+21,8 % / +20,2 %
$l_p = 11300$ mm	- / -	+11,4 % / +10,7 %	+13,7 % / +12,8 %	+15,9 % / +14,8 %	+19,3 % / +17,9 %	+21,7 % / +20,1 %

Taulukko 10. Valmistuskustannuksien vertailu ASME-standardin mukaisella päätypaksuudella 23160 laakerilla halkaisijoittain (vaippa alihankittuna / vaippa itse valmistettuna).

	$D_u = 1830$ mm	$D_u = 2000$ mm	$D_u = 2050$ mm	$D_u = 2100$ mm	$D_u = 2150$ mm	$D_u = 2200$ mm
$l_p = 7250$ mm	- / -	+16,1 % / +15,0 %	+18,3 % / +17,0 %	+20,5 % / +18,9 %	+24,0 % / +22,2 %	+26,3 % / +24,3 %
$l_p = 9300$ mm	- / -	+15,5 % / +14,6 %	+17,7 % / +16,6 %	+19,9 % / +18,6 %	+23,4 % / +21,8 %	+25,7 % / +23,9 %
$l_p = 11300$ mm	- / -	+15,0 % / +14,2 %	+17,2 % / +16,2 %	+19,5 % / +18,3 %	+22,9 % / +21,4 %	+25,2 % / +23,5 %

Valmistuskustannusten vertailun tuloksista huomataan, että siinä tapauksessa, kun teräksisen kuivatussylinterin vaippa ostetaan alihankijalta, valmistuskustannukset kasvavat enemmän halkaisijaa kasvattaessa kuin siinä tapauksessa, kun vaippa valmistettaisiin itse. Täytyy kuitenkin huomioida, että valmistuskustannukset ovat pienemmät, kun

vaippa ostetaan alihankkijalta. Taulukossa 11 on esitetty kustannusero, kun vaippa valmistetaan itse verrattuna alihankittuun vaippaan.

Taulukko 11. Valmistuskustannuksien erot alihankitun ja itse valmistetun vaipan välillä.

	Alihankittu vaippa $D_u = 1830 \text{ mm}$	Itse valmistettu vaippa $D_u = 1830 \text{ mm}$
$l_p = 7250 \text{ mm}$	-	+7,1 %
$l_p = 9300 \text{ mm}$	-	+4,4 %
$l_p = 11300 \text{ mm}$	-	+2,4 %

Voidaankin siis todeta, että terässylinteri on edullisempi valmistaa, jos on mahdollista ostaa vaippa valmiiksi hitsattuna alihankkijalta. Kuitenkin jos vaippa valmistetaan itse, isompihalkaisijaiset sylinterit ovat suhteessa edullisempia 1830 mm halkaisijaiseen sylinteriin nähden kuin vaippa alihankittuna.

7.2 Vaadittavat investoinnit

Toimeksiantaja valmistaa teräksiset kuivatussylinderinsä Kiinassa sijaitsevalla toimipisteellään. Laitteita hankittaessa ja uudistaessa on mietitty mahdollista isompaa halkaisijaa ja lähes kaikilla laitteilla pystytäänkin valmistamaan kuivatussylintereitä aina $D_u = 2200 \text{ mm}$ asti. Aivan kaikin puolin isompien sylinterien valmistaminen ei vielä käytännössä onnistu ja tilannetta kartoitettiin toimeksiantajan edustajien [32][46] kanssa.

Ensimmäisenä tarkastettiin $D_u = 2200 \text{ mm}$ terässylinterin laskennallinen paino ja verrattiin sitä verstaan nosturin rajoituksiin ja todettiin, että isomman sylinterin paino ei tule ylittämään nosturin painorajaa. Rajoittaviksi kohteiksi, jotka vaativat jonkinlaisia investointeja todettiin sisäSORVAUS, lämpökäsittely ja rullapukit. Kaikki investointia vaativat muutokset todettiin pieniksi investoinneiksi ja mahdollisiksi toteuttaa, jos isompia kuivatussylintereitä olisi kannattavaa alkaa valmistamaan.

7.3 Kokonaiskustannukset

Kuivatusosan kokonaiskustannuksiin vaikuttavat todella monet tekijät ja kokonaisuuden tarkka kustannuslaskenta on todella hankalaa. Tässä työssä kokonaiskustannukset las-

kettiin luvussa 6.4 esitetyn referenssikuiivatusosan muutoksien mukaan käyttäen halkaisijoittain saatuja kuivatussimulointiarvoja. Kun kuivatussylinterien määrä vähenee, niin samalla jokaista sylinteriä kohti linjalta vähenee myös VAC-tela, kaavari ja ajettavuuslaatikko. Kokonaiskustannukset laskettiin COGS-muodossa. Laskennassa käytettiin työssä selvitettyjä terässylinterien valmistuskustannuksia ja muiden kuivatusosan komponenttien COGS-hintoja, jotka selvitettiin kunkin tuotteen tuotepäälliköiltä.

Terässylintereiden ja komponenttien vähentämisen perusteella laskettiin syntyvät kokonaisäästöt, jotka jaettiin uudelle vaadittavalle sylinterimäärälle. Täten voitiin laskea kuinka paljon isompi terässylinteri saa maksaa enemmän kuin $D_u = 1830$ mm terässylinteri, jotta oltaisiin niin sanotusti nollatilanteessa. Tätä saatua arvoa verrattiin kyseisen sylinterikoon valmistuskustannuksien ja alkuperäisen $D_u = 1830$ mm kuivatussylinterin valmistuskustannuksien erotukseen ja summa kerrottiin uudella sylinterimäärällä. Täten tulokseksi saatiin, että referenssilinjalla voitaisiin aikaansaada säästöjä jokaisella isomalla halkaisijaluokalla. Säästöpotentiaali kasvaa kuitenkin halkaisijan mukana, joten kannattavinta olisi vaihtaa isoimpaan mahdolliseen kokoluokkaan eli $D_u = 2200$ mm terässylintereihin. Taulukossa 12 on esitetty säästöpotentiaali kuivatusosalla vähentyneiden komponenttien ja sylintereiden perusteella standardeittain vaippa alihankittuna ja vaippa itse valmistettuna.

Taulukko 12. Säästöpotentiaali kuivatusosalla (vaippa alihankittuna / vaippa itse valmistettuna).

	$D_u = 1830$ mm	$D_u = 2000$ mm	$D_u = 2050$ mm	$D_u = 2100$ mm	$D_u = 2150$ mm	$D_u = 2200$ mm
Säästöpotentiaali EN-standardilla	- / -	5,4 % / 5,6 %	8,1 % / 8,4 %	7,2 % / 7,5 %	9,7 % / 10,1 %	12,6 % / 13,0 %
Säästöpotentiaali ASME-standardilla	- / -	4,9 % / 5,1 %	7,6 % / 7,9 %	6,7 % / 7,0 %	8,7 % / 9,1 %	11,6 % / 12,0 %

Kuten luvussa 6.4 todettiin kuivatussimulointien ohessa, kuivatusosa pitenee hieman, kun terässylinterin halkaisijaa kasvatetaan. Kuivatusosan piteneminen tarkoittaa sitä, että koko tehdas joudutaan rakentamaan pidemmäksi kuin aikaisemmalla $D_u = 1830$ mm kokoluokalla. Pituuserot eivät ole kovin pitkiä, mutta rakentamiskustannukset ovat suuria. Rakennuskustannusten huomioon ottaminen laskee säästöpotentiaalia jopa miinuksen puolelle muutamissa tapauksissa pienemmillä halkaisijoilla. Suuremmilla halkaisijoilla rakennuskustannuksia huomioiminen ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi kannattavuuteen.

8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn aikana selvisi, että teräksisen kuivatussynterinin halkaisijaa voidaan kasvattaa aina $D_u = 2200$ mm asti, pienin rakennemuutoksien. Rakennemuutoksiin lukeutuu akselin kasvattaminen molemmilla EN- ja ASME-standardeilla ja päätylevyn paksuntaminen ASME-standardilla. Tämän vuoksi työssä tutkittiin kahta eri tuotemallia joista toinen on EN-standardin mukainen ja toinen on ASME-standardin mukainen. Työssä pohdittiin myös laakerikoon kasvattamisen tarvetta. Todettiin, että suurimmalla osalla $D_u = 2200$ mm terässylintereistä laakerikokoa ei tarvitse kasvattaa. Todettiin, että laskennallisesti laakerikokoa tarvitsee kasvattaa vasta suurimmilla terässylinteritapauksilla, jotka pyörivät hitaasti, koska hidaskäyttö ei ole hyväksi laakerin voitelukalvoille ja tähän yhdistettynä suuri laakerikuorma aiheuttaa tarpeen kasvattaa laakerikokoa.

Työn lähtötietona oli, että $D_u = 2200$ mm on yläraja terässylinterille valmistettavuuden, mutta myös kuljetuksen kannalta. Työn aikana kuitenkin todettiin, että isointa sylinterikokoa ei ole mahdollista saada mahtumaan kovakattoiseen tai normaaliin open top-konttiin, jolloin jouduttaisiin aina käyttämään korkeampaa open top-konttia. Tämä johtuu siitä, että open top-konttien kattoaukko ei avaudu tarpeeksi leveälle, jotta $D_u = 2200$ mm sylinteri mahtuisi sitä kautta sisään. Käytännössä siis ainoa kannattava tapa kuljettaa $D_u = 2200$ mm terässylinteriä esimerkiksi Kiinasta Eurooppaan on HCOT-kontissa, jonne se täytyy lastata oven kautta sisään. Työssä todettiin myös, että kuivatussynterien valmistusvolyymistä johtuen muut mahdolliset ja kontteihin verrattuna kalliit kuljetustavat (Flat Rack ja Break Bulk) eivät tule kysymykseenkään.

Kuivatustehoa simuloitiin toimeksiantajan Qa PaperiSim-ohjelmalla käyttäen referenssinä erästä tavanomaisesta yksiviiraviennillä toimivaa etukuivatusosaa. Simulointituloksien perusteella todettiin, että teräksisen kuivatussynterinin halkaisijan kasvaessa tulee kuivatusosasta tehokkaampi ja kuivatussynterinitä voidaan vähentää enemmän halkaisijan kasvaessa. Sylintereitä vähenee lineaarisesti enemmän, kun terässylinterin halkaisija kasvaa. Samalla huomattiin, että terässylinterin halkaisijaa kasvattaessa kuivatusosan pituus itseasiassa kasvaa hieman eikä lyhene, kuten työn alussa luultiin tapahtuvan.

Teräksisen kuivatussynterinin halkaisijan kasvattamisen vaikutuksia sen valmistuskustannuksiin arvioitiin ja vertailtiin toimeksiantajan tarjoaman kustannusmallin avulla. Todettiin, että kustannusjakaumat eivät muutu merkittävästi halkaisijaa kasvattaessa, mutta materiaalikustannuksissa akselien ja päätykappaleiden osuudet kasvoivat loogi-

sesti. Kustannusarvioiden ja -vertailujen perusteella saadut tulokset todettiin järjestykselliseksi ja oikeanlaisiksi toimeksiantajan edustajien kanssa. Kustannuksia arvioitiin erikseen EN- ja ASME-standardin mukaisilla terässylintereillä sekä vaippa alihankittuna ja vaippa itsevalmistettuna. Näin saatiin laajat vertailuarvot ja saatiin todettua hintaerot eri valmistuspaikkojen ja rakenteiden välillä. Myöskin investoinnit, joita $D_u = 2200$ mm sylinterin valmistaminen vaatisi, kartoitettiin toimeksiantajan edustajien kanssa. Todettiin, että investoinnit eivät tulisi esteeksi, jos selviäisi, että teräksisen kuivatussylinterin halkaisijaa olisi kannattavaa kasvattaa.

Koko referenssi kuivatusosasta tehtiin valmistuskustannusarvio, jonka jälkeen laskettiin säästöpotentiaalit halkaisijoittain kuivatussimulointien tuloksia hyödyntäen. Tuloksien perusteella koko kuivatusosan valmistuskustannuksissa voitaisiin päästä jopa 13 % säästöihin käyttäessä $D_u = 2200$ mm teräksistä kuivatussylinteriä verrattuna $D_u = 1830$ mm terässylinteriin. Halkaisijan kasvattamisen johdosta kuivatusosa pitenee hieman, joka huonontaa kokonaissäästöjä mutta ei vaikuta COGS-muotoisiin kustannuksiin. Valmistuskustannuksien säästöpotentiaali kasvaa halkaisijaa kasvattaessa, joten $D_u = 2200$ mm olisi kaikkein paras vaihtoehto kustannusmielessä.

Isomman terässylinterin rakennetta optimoimalla voitaisiin mahdollisesti päästä vielä hieman alempiin kustannuksiin tuotteen vakioituessa, mutta tutkitusti suurin osa kuluista on materiaalikuluja, joista ei juuri voi tinkiä. Tutkimuksen perusteella olisi kannattavaa alkaa valmistamaan $D_u = 2200$ mm teräksisiä kuivatussylintereitä, mutta sitä ennen olisi tehtävä ainakin seuraavat toimenpiteet:

- Investoinnit tuotantoon
- Prototyyppi, jolla testattava käytännössä:
 - o Mahtuvuus konttiin
 - o Sylinterin staattinen ja dynaaminen käyttäytyminen

Näiden toimenpiteiden ja niistä saatujen tuloksien jälkeen voitaisi päätätä suuremman halkaisijan terässylintereiden valmistamisen aloittamisesta. Muita esteitä valmistamisen aloittamiseksi ei pitäisi olla. On näytetty, että valurautaisia $D_u = 2200$ mm kuivatussylintereitä pyörii koneissa maailmalla ja teräksisen kuivatussylinterin halkaisijan kasvattaminen on turvattu patentein toimeksiantajan toimesta.

Työn tavoitteena oli selvittää, että saataisiinko paperikoneen kuivatusosasta tehokkaampi, edullisempi ja lyhyempi, jos siirrytään käyttämään isompihalkaisijaisia kuivatussylintereitä pitäen $D_u = 2200$ mm ylärajana. Työn tuloksena selvisi, että kuivatusosasta

saadaan tehokkaampi ja edullisempi, mutta ei lyhyempää. Kaikkiin työn alussa esitettyihin tutkimiskysymyksiin saatiin vastaukset, joiden avulla työn tavoite saavutettiin. Toimeksiantaja oli tyytyväinen tutkimuksen laatuun ja tuloksiin.

LÄHTEET

- [1] About ASME. The American Society of Mechanical Engineers, Viitattu 22.2.2023, Saatavissa: <https://www.asme.org/about-asme>
- [2] Adams, C., Ziegelwanger, A. Drying cylinder for a paper machine. Pat. WO2019072450A1, Hak.nro EP2018073307W, 30.8.2018, (18.4.2019)
- [3] Aineistonhankintamenetelmät. Jyväskylän yliopisto, 2014, Viitattu 20.2.2023, Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/aineistonhankintamenetelmät>
- [4] Anttilainen, S., Hyppänen, H-P., Juppi, K., Mikkilä, H. The drying part of the fiber web machine. Pat. FI10690U1, Hak.nro FIU20144227U, 20.10.2014, (14.11.2014)
- [5] ASME by the Numbers. The American Society of Mechanical Engineers, 2022, Viitattu 22.2.2023, Saatavissa: https://www.asme.org/getmedia/12e28501-4520-42ec-ab8b-aeb0353ad801/asme_by_the_numbers_2022_v10.pdf
- [6] ASME-koodin mukaiset tarkastuspalvelut painelaitteille. Kiwa Inspecta, Viitattu 22.2.2023, Saatavissa: <https://www.kiwa.com/fi/fi/palvelumme2/tarkastus-varmennus-ja-kalibrointi/asme-koodin-mukaiset-tarkastuspalvelut-painelaitteille/>
- [7] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P. & Dewitt, D. P., Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7. painos. Yhdysvallat: John Wiley & Sons, 2011, s. 1048, ISBN 978-0470-50197-9
- [8] Boiler and Pressure Vessel Certification. The American Society of Mechanical Engineer, Viitattu 23.2.2023, Saatavissa: <https://www.asme.org/certification-acc-creditation/boiler-and-pressure-vessel-certification>
- [9] Certificate Holder Search. The American Society of Mechanical Engineers, Viitattu 23.2.2023, Saatavissa: <https://caconnect.asme.org/directory/>
- [10] Chief Engineer, Rolls. Keskustelut diplomityön aikana, 2.1. – 15.5.2023
- [11] Cost of Goods Sold (COGS) Explained With Methods to Calculate It. Investopedia, 2023, Viitattu 25.4.2023, Saatavissa: <https://www.investopedia.com/terms/c/cogs.asp>
- [12] Directive 2014/68/EU of the European Parliament and of the Council. EUR-Lex, 2014, Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014L0068>
- [13] Doctoring 101. Valmet, 2011, Viitattu 15.5.2023, Saatavissa: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/process-improvements-and-parts/wpp_doctoring.pdf
- [14] Dryer Fabrics. Valmet, 2014, Viitattu 14.2.2023, Saatavissa: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/process-improvements-and-parts/wpp_fabricsdryer.pdf

- [15] Empiirinen tutkimus. Skepsis ry, Viitattu 20.2.2023, Saatavissa: https://www.skepsis.fi/ihmeellinen/empiirinen_tutkimus.html
- [16] Ex Works (EXW) Defined, Pros and Cons, Plus More Incoterms. Investopedia, 2023, Viitattu 25.4.2023, Saatavissa: <https://www.investopedia.com/terms/e/exw.asp>
- [17] Fagerholm L. Dryer fabrics. Teoksessa: Karlsson, M. (toim.) Papermaking Part 2, Drying. 2. painos. Helsinki: Paperi ja Puu Oy, 2010, s. 542-577. ISBN 978-952-5216-37-0
- [18] FEA-laskennan teoriaa. Vertex tuotedokumentaatio, Viitattu 18.4.2023, Saatavissa: <https://kb.vertex.fi/fea2017fi/tutustu-tarkemmin-ominaisuuksiin/yleiset-aiheet/fea-laskennan-teoriaa>
- [19] FEM Simulointeja D=2100 mm. Toimeksiantajan sisäinen tietokanta, 2013
- [20] Forsberg, K. Putkitelan kuorimuodonmuutosten mallinnus. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, 2006, s. 79, Saatavissa: <http://innoforest.tkk.fi/Kimi.Forsberg.DT.pdf>
- [21] Ghosh, A. J. Fundamentals of Paper Drying – Theory and Application from Industrial Perspective. Teoksessa Ahsan, A. (toim.) Evaporation, Condensation and Heat transfer. IntechOpen, 2011, s. 535–582, ISBN 978-953-51-6047-2, Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.5772/1042>
- [22] Günther, K., Hasanen, K. & Juhila, K. Johdanto: Analyysi ja tulkinta. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto, Viitattu 16.2.2023, Saatavissa: <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/analyysitavan-valinta-ja-yleiset-analyysitavat/analyysi-ja-tulkinta/>
- [23] Hyppänen, H-P. The drying cylinder of the fiber web machine. Pat. FI10687U1, Hak.nro FIU20144226U, 20.10.2014, (13.11.2014)
- [24] Juhanko J. Dynamic geometry of a rotating paper machine roll. Väitöskirja. Espoo: Aalto-yliopisto, 2011, s. 172, ISBN 978-952-60-4364-7, Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-4364-7>
- [25] Juppi, K. Multicylinder dryer and drying concepts (alkuperäinen teksti Heikkilä, P., Timofeev, O., Kiiskinen, H. & Kuhasalo A.) Teoksessa: Karlsson, M. (toim.) Papermaking Part 2, Drying. 2. painos. Helsinki: Paperi ja Puu Oy, 2010, s. 78-125, ISBN 978-952-5216-37-0
- [26] Karlsson, M. & Paltakari, L. Introduction to paper drying and its principles. Teoksessa: Karlsson, M. (toim.) Papermaking Part 2, Drying. 2. painos. Helsinki: Paperi ja Puu Oy, 2010, s. 13-38, ISBN 978-952-5216-37-0
- [27] KnowPap 24.0. Paperitekniiikan ja automaation oppimisympäristö. 2023. Viitattu 6.2.2023. Saatavissa: <http://www.knowpap.com/extranet/>
- [28] Kuivatussyylinterin pakkausohje. Toimeksiantajan sisäinen tietokanta, 2022
- [29] Määrällinen analyysi. Jyväskylän yliopisto, 2021, Viitattu 16.2.2023, Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/aineiston-analyysimenetelmat/maarallinen-analyysi>

- [30] MacCamhaoil, M. Static and Dynamic Balancing of Rigid Rotors. Brüel & Kjær, s. 20, Viitattu 1.3.2023, Saatavissa: <https://www.bksv.com/media/doc/bo0276.pdf>
- [31] Machine list of bigger diameter dryer cylinders. Toimeksiantajan sisäinen tietokanta, 2023
- [32] Manager, Production Development. Palaveri D2200 terässylintereiden valmistukseen liittyen, 18.4.2023.
- [33] Niskanen, J. Paperiteollisuuden koneet -kurssin luentorunko osa 2: kuivatusosa. Oulu: Oulun Yliopisto, 2022, s. 30
- [34] OptiRun cylinder drying. Valmet, Viitattu 10.2.2023, Saatavissa: <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/cylinder-drying/optirun-cylinder-drying/>
- [35] Painelaitteet. Tukes, Viitattu 21.2.2023, Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet#991ae4b3>
- [36] Painelaitteiden suunnittelu, valmistus ja vaatimustenmukaisuuden arviointi. Tukes, Viitattu 21.2.2023, Saatavissa: <https://tukes.fi/tietoa-tukesista/materiaalit/painelaitteet/painelaitteiden-suunnittelu-valmistus-ja-vaatimustenmukaisuuden-arviointi>
- [37] Palviainen J. EN- ja ASME-standardien vaatimusten vertailu painelaitteiden valmistuksessa ja hitsauksessa. Kandidaatintyö. Lappeenranta: LUT-yliopisto, 2023, s. 34
- [38] Perna, J. Kehittämistutkimus tutkimusmenetelmänä. 2013, Saatavissa: https://tuhat.helsinki.fi/ws/files/127650174/2013_Perna_KT_tutkimusmenetelmana_KT_kirj
- [39] Perttula, J-P. Teräsrakenteisen kuivatussylinderin ja sen kustannustehokkaan valmistusketjun kuvaaminen. Diplomityö. Oulu: Oulun Yliopisto, 2017, s. 116
- [40] Pokela, K. Paperikoneen johtotelojen kunnossapidon kehittäminen. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, 2006, s. 106, Saatavissa: <http://innoforest.tkk.fi/Kari.Pokela.DT.pdf>
- [41] Pressure Equipment Directive – Category and Module Decision Flowchart – 2014/68/EU. Kiwa Inspecta, Saatavissa: https://www.kiwa.com/4921ff/globalassets/dam/kiwa-corporate/downloads/kiwa_ped2014_68_eu_poster.pdf
- [42] Pressure Equipment Directive. European Commission, Viitattu 21.2.2023, Saatavissa: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/pressure-equipment-and-gas-appliances/pressure-equipment-sector/pressure-equipment-directive_en
- [43] Product Manager, Dryer Cylinders & Heavy Rolls. Keskustelut diplomityön aikana, 2.1. – 15.5.2023
- [44] Rakenteen maksimitat kuljetuksen näkökulmasta. Toimeksiantajan sisäinen tietokanta, 2018

- [45] Roll types for board and paper machines. Valmet, Viitattu 14.2.2023, Saatavissa: [Rolls and cylinders for board and paper making | Valmet](#)
- [46] Senior Development Manager. Palaveri D2200 terässylinterien valmistukseen liittyen, 18.4.2023.
- [47] Steam & condensate 2 – condensate, heat transfer and maintenance. Valmet, 2015, Viitattu 8.2.2023, Saatavissa: <https://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/performance/RTSC2/>
- [48] Steam & Condensate System Improvements. Valmet, 2012, Viitattu 14.2.2023, Saatavissa: https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/drying-and-air-systems/wpd_steamcondensate.pdf
- [49] Teoreettinen tutkimus. Jyväskylän yliopisto, 2015, Viitattu 20.2.2023, Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/teoreettinen-tutkimus>
- [50] Toimeksiantajan ex-Development Manager, Kaksi kertaa kierroksella heiton havainnollistaminen, Toimeksiantajan sisäinen tietokanta, 2023
- [51] Toimeksiantajan ex-Development Manager, Keskustelut terässylinterin dynaamisiin ominaisuuksiin liittyen, 24.2.2023
- [52] Troubleshoot dryers and steam & condensate systems, part 1. Valmet, 2022, Viitattu 14.2.2023, Saatavissa: <https://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/performance/TroubleshootDryerSC1/>
- [53] Valmet dryer cylinders. Valmet, 2018, Viitattu 13.2.2023, Saatavissa: [Preview - Cast iron dryer cylinders for high drying efficiency \(salesforce-sites.com\)](#)
- [54] Valmet steel dryer cylinders. Valmet, 2019, Viitattu 13.2.2023, Saatavissa: [Preview - Steel dryer cylinder for excellent drying performance \(salesforce-sites.com\)](#)
- [55] Vertaileva tutkimus. Jyväskylän yliopisto, 2015, Viitattu 15.2.2023, Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/vertaileva-tutkimus>
- [56] Vilka, H. Tutki ja mittaa: Määrällisen tutkimuksen perusteet. Helsinki: Tammi, 2007, s. 188, Saatavissa: https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/98723/Tutki-ja-mittaa_2007.pdf
- [57] Villgren, H. Kuivatussylinterin D2200 suunnittelu ja lujuuslaskenta. Insinööriyö. Jyväskylä: Teknillinen oppilaitos, Koneosasto, 1992, s. 109
- [58] Vuori, J. Laadullinen sisällönanalyysi. Tampere: Yhteiskuntatieteellinen tietoarkisto, Viitattu 16.2.2023, Saatavissa: <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvali/analyysitavan-valinta-ja-yleiset-analyysitavat/laadullinen-sisallanalyysi/>
- [59] Wedel, G. L. & Timm, G. L. Heat Transfer Performance with Dryer Bars. Kadant Inc., 2016, s. 18 Saatavissa: <https://www.slideshare.net/kadant/heat-transfer-performance-with-dryer-bars>