Tampereen yliopisto

Topi Salminen

HÖYRYKUIVAIMEN TIIVISTÄMINEN PAPERIRATAA VASTEN

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Timo Lehtonen
Mikko Vanhatalo
5/2025

TIIVISTELMÄ

Topi Salminen: Höyrykuivaimen tiivistäminen paperirataa vasten
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2025

Tämä diplomityö on tehty Valmet Technologies Oy:lle, joka on maailman johtava paperi- ja kartonkikoneita tekevä yritys. Valmet kehittää ja suunnittelee paperi- ja kartonkikoneita ja niihin liittyviä teknologioita. Teknologiajohtajan asemassa yritys panostaa nykyaikaisten arvojen mukaan myös ekologisuuteen tuotannossa ja koneiden käytössä. Tulistettu höyry on tunnistettu yhdeksi potentiaaliseksi energiatehokkuutta ja näin ollen ekologisuutta parantavaksi tekijäksi. Tulistetulla höyryllä kuivaamista on tutkittu ennenkin Teknologian tutkimuskeskus Oy:n (VTT) ja Valmetin toimesta, mutta EU:n rahoittama SteamDry -konsortioprojekti on herättänyt idean uudelleen esille. Tämä työ on tehty osana SteamDry -projektia ja työn tarkoituksena on ollut löytää ratkaisu kuivaimen tiivistämiseen, sillä edelliset testilaitteistot ovat näyttäneet tiivistyksen olevan kriittinen osa kuivaimen onnistumista.

Työn taustaosuudet on tehty kirjallisuuskatsauksena, jossa perehdytään ensin paperiteknologiaan, paperin valmistukseen ja kuivatusosan toimintaan. Taustaosuuksissa käsitellään aiheeseen liittyviä fysiikan lakeja ja ilmiöitä sekä tutustutaan teknologian nykytasoon kirjallisuuden ja patenttien kautta. Näiden pohjalta tutkittiin edellisistä projekteista syntyneiden ideoiden ja patenttien toteuttamiskelpoisuutta. Lupaavimmat konseptit vietiin simulaattoriin, jossa niiden toimintaa arvioitiin. Tavoitteena oli tunnistaa toimivia konsepteja, joita voidaan ehdottaa jatkokehitykseen. Työssä kokeiltiin myös nopeaa konseptien karsimista simulaattorissa. Siinä tutkittiin ideoiden pohjalta karkeasti mallinnettujen tiivisteiden toimintaa, jotta nähtiin toteutuvatko ideoiden oletetut periaatteet.

Tuloksena saatiin perusteet, miksi jotkin ideat eivät toimineet ja mitä ideaa voisi kehittää eteenpäin diplomityön jälkeen.

Diplomityön tavoitteet saavutettiin ja tutkimuskysymyksiin löydettiin vastaukset. Valmet jatkaa tiivisteiden kehitystä SteamDry -projektissa työn jälkeen tulosten pohjalta.

Avainsanat: Tulistettu höyry, tiivistäminen, paperikone, kartonkikone, kuivaus, kuivatusosa, päällepuhalluskuivaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Topi Salminen: Steam dryer sealing against paper web
Master's Thesis
Tampere University
Master´s Degree Programme in Mechanical Engineering
May 2025

This master's thesis has been done for Valmet Technologies Oy, which is the leading paper and board machine maker. Valmet develops and designs paper and board machines and related technologies. As the technology leader of the industry, the company is in line with modern values and focuses on ecological production and use of the machines. Superheated steam has been recognized as one potentially energy saving and ecology improving factor. Superheated steam has been studied previously by Teknologian Tutkimuskeskus Oy (VTT) and Valmet but the Eu funded SteamDry consortium project has brought the idea back. This thesis has been done as a part of the SteamDry project, and the purpose of the work has been finding a solution for the sealing of the dryer since all previous tests have shown that sealing is a critical part of the success of the dryer.

Theory section of the thesis has been made as a literary review, where we familiarize with paper technology, paper making and the working principles of the drying section. Theory section includes related laws of physics and phenomena and introduces to the current state of the technology through literature and patents. New and old ideas and concepts were examined, and their feasibility was evaluated based on the former sources. The most promising inventions were made into simulation models, and their operation was studied further. The goal was to recognize working concepts to be suggested for further development. Rapid elimination of concepts was also used while simulating. There the ideas were put to the test as rough simulation models to see if they work as presumed and if they had potential.

As a result, we got reasons why some of the old ideas didn't work and which ideas could be developed further after the master's thesis.

The goal of the master's thesis was met and answers to the research questions were found. Valmet continues to develop the sealing further in the SteamDry project based on the thesis work.

Keywords: Superheated steam, sealing, paper machine, board machine, drying, drying section, impingement drying

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☒ Ei
☐ Kyllä

ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Valmet Technologies Oy:lle syksyn 2024 ja kevään 2025 välillä Rautpohjan paperikoneiden kuivatusosakehitysyksikössä osana Euroopan unionin rahoittamaa SteamDry konsortioprojektia. Työn tarkoitus on löytää ratkaisu vanhaan ongelmaan, jota ei aiemmin pystytty ratkaisemaan.

Haluan kiittää Kalle-Matti Romppaista ja Jyrki Huovilaa työn aiheen järjestämisestä ja ohjauksesta työn aikana, sekä koko SteamDry-tiimiä Valmetilla työn taustalla. Haluan myös kiittää Tampereen yliopistolta työn ohjaajia, Timo Lehtosta ja Mikko Vanhataloa akateemisesta ohjauksesta. Haluan vielä kiittää Timo Siikosta ja Pauli Losoita avusta työn sisällön kanssa.

Lopuksi haluan kiittää läheisiä ja ystäviä avusta ja tuesta opintojen aikana, erityisesti Henna-Riikkaa ja Tonia.

Tampereella, 14.5.2025

Topi Salminen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
    1.1 Tausta 1
    1.2 Valmetin ilmasto-ohjelma 2
2. PAPERITEKNOLOGIA 3
    2.1 Paperin valmistus ja yleisiä termejä 3
    2.2 Perälaatikko 4
    2.3 Viiraosa 4
    2.4 Puristin 5
    2.5 Kuivatusosa 7
    2.6 Jälkikäsittely 9
3. TULISTETTU HÖYRY 10
4. TUTKIMUSONGELMA JA TUTKIMUKSEN TYYPPI 12
5. TIIVISTEIDEN SELVITYS 13
    5.1 Tiivisteiden teoria 13
        5.1.1 Bernoullin laki 13
        5.1.2 Virtauksen ominaisuuksia 13
        5.1.3 Coandă-efekti 14
        5.1.4 Kerrostuminen 16
    5.2 Tutkimustieto 16
        5.2.1 Kirja – Seals and Sealing, Handbook 17
        5.2.2 Tutkimus passiivisesta ilmaverhosta labyrintissä 20
    5.3 Olemassa olevat ratkaisut ja niiden arviointi 22
        5.3.1 JUJO-Paper/Nippon Paper patentti 22
    5.4 Inoue Kinzoku Kogyo patentti 24
    5.5 Fraunhofer testilaitteisto 26
    5.6 Valmetin vanhat keksinnöt 27
6. RAJAKERROSVIRTAUS 30
    6.1 Viirat 30
    6.2 Viiran karheuden simulaattoriarvojen selvittäminen 31
7. TIIVISTEIDEN KEHITYS 32
    7.1 Aiempien ideoiden arviointi 33
    7.2 Uudet ideat 34
    7.3 Simulointiin valittavat tiivisteet 35
    7.4 Simulointiasettelun esittely 36
8. SIMULOINNIN TULOKSET 38
    8.1 Kylkien reunaehtojen vaikutus tuloksiin 38
    8.2 Tiivisteiden simulointi 39

9. VAIHTOEHTOISET RATKAISUT 40
10. YHTEENVETO 41
10.1 Tulokset 41
10.2 Jatkotutkimuskohteet 42
10.3 Loppusanat 44
11. LÄHTEET 45
LIITTEET 47

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CFD	engl. Computational Fluid Dynamics, virtauslaskenta
EU	Euroopan unioni
SSD	engl. Superheated Steam Drying, tulistetulla höyryllä kuivaaminen
VTT	Teknologian tutkimuskeskus Oy (entinen Valtion teknillinen tutkimuslaitos)
WUR	Wageningen University and Research
YK	Yhdistyneet Kansakunnat

g	Painovoima
L	Pituus
μ	Viskositeetti
P	Paine
Re	Reynoldsin luku
ρ	Tiheys
U	Nopeus
z	Korkeus

1. JOHDANTO

Paperin valmistaminen perustuu pitkälti veden poistamiseen massasta. Paperikoneesta suurin osa onkin tehty kuivaamista varten ja se on koneen kallein osa. Kuivaamisen tehokkuus heijastuu suoraan sekä valmistajan että asiakkaan kustannuksissa, kun uutta konetta ja tehdasta rakennetaan. Tästä syystä veden poistamista massasta koitetaan kehittää jatkuvasti paperikoneen eri osa-alueilla, etenkin kuivatusosalla.

Höyryllä kuivaaminen ei ole uusi keksintö, vaan sitä on tutkittu ennenkin. Teoriassa höyryllä kuivaaminen on tehokkaampaa, kuin ilmalla kuivaaminen. Käytännön toteutuksissa kuitenkin on törmätty aina haasteisiin, joita ei ole pystytty ratkaisemaan. Yksi näistä on tämän diplomityön aihe: tiivistäminen.

Tämä työ on jatkotutkimus Jere Näverin diplomityöhön [1]. Näverin työn aiheena oli tulistetulla höyryllä kuivaamisen toteutuskelpoisuuden selvittäminen. Työssä sivuttiin edellisten projektien haasteita ja tiivistäminen oli nostettu esille yhtenä haasteena sekä jatkotutkimuskohteena. Molemmat diplomityöt on tehty Valmet Technologies Oy:lle, johon viitataan tässä työssä lyhyemmin nimellä Valmet.

Työ on tehty osana Euroopan unionin (EU) rahoittamaa SteamDry-projektia. Projektin vetäjänä toimii Teknologian tutkimuskeskus Oy (VTT) ja projektissa on mukana 14 osapuolta, jotka ovat yrityksiä, yliopistoja sekä tutkimuslaitoksia. Valmet toimii projektissa laitetoimittajana. Tiivistys on osa Wageningen University and Research -yliopiston (WUR) johtamaa työpakettia 6, jonka tarkoituksena on löytää ratkaisuja, joilla estetään ilman ja kuitujen päätyminen kuivausjärjestelmän sisään. [2]

1.1 Tausta

Höyryllä kuivaamista on tutkittu paperin valmistamisessa ennenkin koska sen kuivausteho ja energiankierrätyspotentiaali ovat suuremmat. SteamDry-konsortion tekemän selvityksen mukaan tulistetun höyryn käyttämisellä ja höyryn kierrättämisellä saavutetaan jopa 60 %:n energiansäästö kuivauksessa, 40 %:n kokonaisenergiassa ja fossiilisista polttoaineista pystytään luopumaan kokonaan [2].

Projektin motivaattorina toimii myös Euroopan Unionin vihreän kehityksen ohjelma, joka tähtää kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämistä 55 %:lla vuoteen 2030 mennessä

verrattuna vuoden 1990 päästöihin. [3] EU:n 55-valmiuspaketti pyrkii tukemaan EU alueen innovaatio- ja kilpailukykyä ja asettaa tavoitteita yritysten päästöille. Paketin tavoitteena on mm. laskea energiaintensiivisten teollisuudenalojen päästöjä ja lisätä uusiutuvan energian osuutta. [4]

1.2 Valmetin ilmasto-ohjelma

Valmet on julkaissut myös oman ilmasto-ohjelmansa, jonka mukaan Valmet sitoutuu pyrkimään kohti hiilineutraaliutta. Ohjelma on saanut Science Based Targets -aloitteen hyväksynnän. Ohjelma on linjassa Pariisin ilmastosopimuksen ja Yhdistyneiden Kansakuntien (YK) kestävän kehityksen tavoitteiden kanssa. [5]

Tavoitteet on asetettu saavutettaviksi vuoteen 2030 mennessä ja tavoitteiden asettamisessa on otettu huomioon arvoketju suunnittelusta käyttöön asti. Kaikki tavoitteet on asetettu verrattavaksi vuoden 2019 tasoon. Toimitusketjussa tavoitteena on vähentää hiilidioksidipäästöjä 20 %:lla mm. kierrätysteräksen käyttöasteen nostolla, tuotteiden keventämisellä, vaihtoehtoisten materiaalien käytöllä sekä kuljettamalla tavaroita vähäpäästöisemmillä tavoilla ja pakkaamalla tehokkaammin. Omassa toiminnassa tavoite on vähentää päästöjä 80 %:lla käyttämällä uusiutuvaa polttoainetta, hiilidioksidivapaan lämmön hankkimisella, energiatehokkuuden parantamisella ja vähähiilisen työmatkustamisen avulla. Etätyöskentelyn kehittäminen on myös erikseen mainittu tapana vähentää hiilidioksidipäästöjä vähentämällä työmatkaliikenteen määrää.

Itse tuotteiden tavoitteet sen sijaan tähtäävät nykyisten tuotteiden päästöjen laskemiseen 20 %:ia. Uusien tuotteiden on määrä olla täysin hiilineutraaleita. Tähän päästään tarjoamalla asiakkaille energiaratkaisuja, jotka mahdollistavat hiilineutraalin tuotannon [5]. Konelinjojen vedenkäsittely on myös nostettu tavoitteeksi, sillä paperin valmistaminen vaatii paljon puhdasta vettä. Tavoitteissa puhutaan veden käytön vähentämisestä, johon monilla tuotteilla pyritään. Toisaalta myös veden kierrätys ja puhdistus ovat tärkeitä tavoitteita, jotta tehtaat eivät tuhlaa vettä tai saastuta ympäristöä [6].

2. PAPERITEKNOLOGIA

Paperin ja kartongin valmistus on pääpiirteittäin hyvin samankaltainen prosessi. Erot ovat yksityiskohdissa, joihin tässä työssä ei syvennytä, joten työssä käytetään termiä paperikone, jolla viitataan sekä paperi- että kartonkikoneisiin. Jos työn kannalta on olennaista, kummasta on kyse, silloin täsmennetään erikseen.

2.1 Paperin valmistus ja yleisiä termejä

Paperia valmistetaan yleisimmin puukuidusta, mutta nykyään sen kanssa käytetään yhä enemmän kierrätyskuitua. Jopa 50 % maailman paperista on kierrätettyä. Paperi pysyy koossa puukuitujen välisten vetysidosten ansiosta, jotka muodostuvat paperimassan kuivauksen aikana. Puukuituja erotetaan puusta joko mekaanisesti tai kemiallisesti, jonka jälkeen kuidut sekoitetaan massaksi veden ja muiden lisättävien aineiden kanssa. Massa ruiskutetaan kankaalle, jota kutsutaan viiraksi. Viiran päälle muodostuu massakerros, jota puolestaan kutsutaan rainaksi tai yleisemmin paperiradaksi. [7]

Paperikonelinja koostuu eri rakenneryhmistä. Ensimmäisenä on perälaatikko. Sitten on viiraosa, jota kutsutaan yleisesti puheessa myös formeriksi sen englanninkielisen nimen, former, mukaan. Viiraosan jälkeen paperi menee puristimeen ja sen jälkeen edelleen kuivatusosalle, joka on yleensä jaettu kahteen osaan. Kuivatusosien välissä on pintakäsittelylaite, jota kutsutaan sizeriksi taas englanninkielisen nimensä, sizer, mukaan. Kuivatusosan jälkeen konelinjoissa on eniten variaatiota, sillä kaikissa koneissa ei ole pinnoituslaitteita tai kalanteria.

Paperikoneessa on kaksi puolta, hoitopuoli ja käyttöpuoli. Hoitopuoli on avoimempi ja tehdashallissa on hoitopuolella yleensä noin koneen levyinen käytävä heti koneen vieressä. Hoitopuolelta suoritetaan useimmat huoltotoimenpiteet ja osien vaihtamiset koska leveä käytävä mahdollistaa pitkien osien käsittelemisen. Käyttöpuoli on puolestaan koneen toisella puolella. Se on saanut nimensä siitä, että käyttömoottorit ovat sillä puolella. Käyttöpuoli on ahdas ja sinne pyritään laittamaan käyttömoottoreiden lisäksi myös ilmakanavat, jotta hoitopuoli voidaan pitää avonaisempana.

Paperikoneessa käytetään useita erilaisia kankaita, joita kutsutaan viiroiksi tai huoviksi. Viirat ja huovat ovat pitkiä silmukoita, jotka pyörivät viirakierrossa, joka muodostuu, kun kangas pingotetaan telojen ja sylintereiden ympärille. Viirojen ja huopien tehtävä on tukea rainaa, kun se on märkä ja mahdollistaa kuivaus.

2.2 Perälaatikko

Perälaatikko on paperikoneen osa, johon paperimassa syötetään. Perälaatikko tuottaa massaan turbulenssia ja suihkuttaa massan viiraosan viiralle, jolloin muodostuu paperiraina. Paperimassa on perälaatikossa 0,5–1 % kuitua, jolloin se saadaan liikkumaan putkistossa helposti ja voidaan suihkuttaa suuttimien läpi tasaisesti. [7]

Massa käsitellään niin kutsutussa lyhyessä kierrossa perälaatikolle sopivaan sakeuteen. Samalla massasta poistetaan epäpuhtauksia ja ilmaa, sekä lisätään lisäaineet. Massa tuodaan perälaatikkoon käyttöpuolelta putkea pitkin, jota kutsutaan jakotukiksi.

Perälaatikoissa on kaksi erilaista toimintaperiaatetta, reikäperälaatikko ja hydrauliperälaatikko. Reikäperälaatikot ovat nykyään korvautuneet lähes täysin hydrauliperälaatikoilla. Reikäperälaatikoita käytetään ainoastaan erittäin hitaissa koneissa, joissa virtausnopeudet eivät riitä hydrauliperälaatikon toimintaperiaatteeseen, joka on avattu seuraavassa kappaleessa.

Perälaatikon sisällä massa syötetään jakopillistön läpi välikammioon. Jakopillistön putkissa on ensin pieni halkaisija ja se muuttuu äkillisesti suuremmaksi, jolla aiheutetaan turbulenssia, joka hajottaa kuituflokkeja (paakkuja) ja tasoittaa massan kuitujakaumaa. Tasauskammioon saapuessaan massan virtausnopeus laskee taas uudelleen ja perälaatikon poikittaiset nopeuserot tasoittuvat. Tasauskammiosta massa taas siirtyy turbulenssigeneraattoriin, eli toiseen settiin putkia, joissa on ensin kapeat osuudet ja sitten leveämmät. Turbulentti virtaus ohjataan huulikanavaan, jossa sen virtausnopeus täsmätään toivottuun nopeuteen. Huulikanavasta tulee ulos tasainen suihku koko radan leveydeltä, jolla raina muodostetaan viiralle.

2.3 Viiraosa

Viiraosalla (engl. Former, puhekielessä suomeksi ”formeri”) syntyy paperiraina. Perälaatikosta suihkutettu massavirta osuu viiraosan viiralle, jossa sen kuivaaminen alkaa. Rainaa kuivataan imemällä massasuspensiosta vettä imulaatikoilla viiran läpi. Viira toimii viiraosalla siivilänä, josta vesi pääsee läpi, mutta kuitu jää viiran pinnalle [7]. Viiraosalla poistetaan noin 97 % rainasta poistuvasta vedestä ja sen kuiva-ainepitoisuus on 15 ja 25 %:in välillä [8].

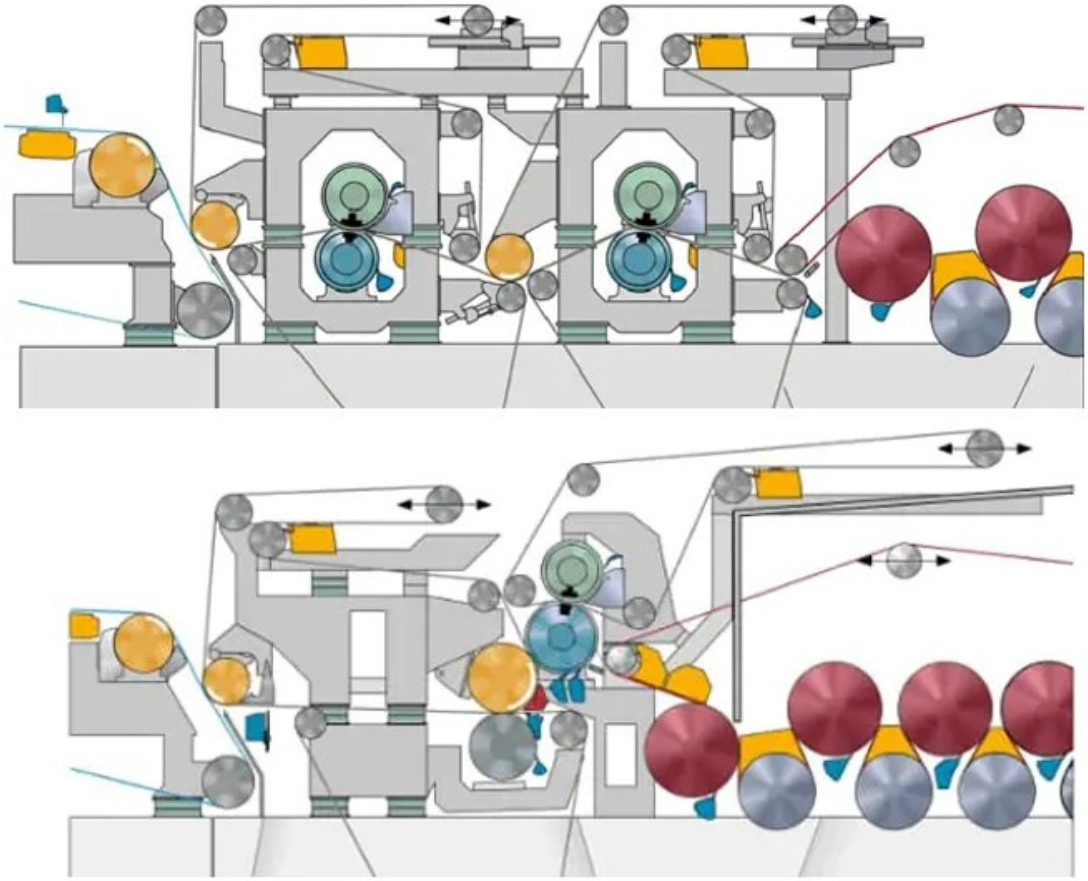
Viiraosia on neljänlaisia: tasoviira (engl. Fourdrinier), hybridiformeri, kitaformeri ja sylinteriformeri. Näistä tasoviira on vanhin, mutta edelleen käytössä. Sen sijaan sylinteriformeri on hyvin harvinainen ja käytössä vain erikoislaatujen valmistuksessa. [7]

Tasoviira on nimensä mukaan vaakatasossa rainan muodostava viiraosa. Tässä fourdrinier-tyyppinen perälaatikko ruiskuttaa massasuspension viiralle, joka kulkee vaakatasossa. Rainaa kuivataan viiran alla olevilla imulaatikoilla. Tasoviiralla kuivaaminen tapahtuu hellävaraisesti, pitkäkestoisesti ja vain yhdeltä puolelta, joka on joillakin paperilajeilla toivottavaa. Hybridiformeri on tasoviira, johon on lisätty toinen viirakierto. Tämä mahdollistaa paperirainan kuivaamisen kummaltakin puolelta. Useasti hybridiformerissa on tasoviira, jolla rainaa kuivataan ensin ja viiraosan keskellä tai lopussa on toinen viirakierto. Toisen viirakierron alueella paperi on kahden viiran välissä ja vettä poistetaan joko keskipakoisvoimalla tai imemällä alipaineella. Kitaformerissa puolestaan massasuspensio suihkutetaan suoraan kahden viiran väliin ja sitä kuivataan molemmilta puolilta yhtäaikaa. Molemmilta puolilta kuivaaminen mahdollistaa usein hyvin lyhyen kuivausmatkan. Tämän ansiosta kitaformerit ovat kompaktimpeja kuin tasoviirat. Sylinteriformeri on nykyään korvattu pääosin monitasoviiralla (engl. Multifourdrinier), joka on yhdistelmä tasoviiroja ja hybridiformereita. Monitasoviiralla voidaan valmistaa monikerrostuotteita käyttäen yksikerroksisia perälaatikoita.

2.4 Puristin

Puristin puristaa nimensä mukaan paperia. Puristaminen tapahtuu joko huovan ja sileän telan välissä tai kahden huovan välissä. Puristuksessa rainan tilavuus pienenee ja vesi pakotetaan rainasta ulos. Puristinhuopa imee osan poistuvasta vedestä ja kuivaa rainaa. Osa vedestä ei sitoudu mihinkään ja kulkee huovan läpi ja lentää pois prosessista. Puristinhuopia kuivataan imulaatikoilla myöhemmin viirakierrossa, jotta ne ovat kuivia uutta puristusta varten [7]. Puristin poistaa rainasta poistuvasta vedestä noin 2 % ja kuiva-ainepitoisuus nousee 33–55 %:iin [8].

Puristinkonsepteja voidaan jakaa nippien, eli puristusten määrän mukaan. Yksinippisessä puristimessa on vain yksi puristus, kaksinippisessa kaksi ja kolmenippisessä kolme [7]. Lineaaripuristimessa jokainen nippi syntyy kahden telan väliin ja nippejä on tyypillisesti yhdestä kolmeen. Keskitelapuristimessa sen sijaan kolme nippiä syntyy keskitelojen ympärille. Tyypillisesti keskiteloja on kaksi, joiden väliin syntyy yksi nippi ja kummallekkin keskitelalle on vielä oma puristintela, joilla saadaan aikaan uudet nipit. Näin ollen neljällä puristintelalla saadaan aikaan kolme nippiä, kun lineaaripuristimessa jokaiseen nippiin vaaditaan kaksi puristintelaa. Kuvassa 1 näkyy esimerkit kaksinippisestä lineaaripuristimesta ja neljätelaisesta ja kolmenippisestä keskitelapuristimesta. [9] [10]

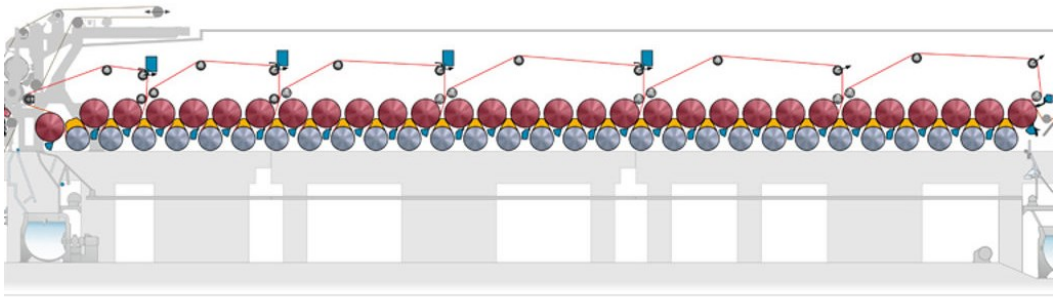


Kuva 1. *Puristintyypit, ylhäällä lineaaripuristin, alhaalla keskitelapuristin [9] [10].*

2.5 Kuivatusosa

Kuivatusosan tehtävä on kuivata paperiraina lopulliseen kuiva-ainepitoisuuteen. Kuivatusosa jaetaan lähes aina etukuivatusosaan ja jälkikuivatusosaan, joiden välissä on pintaliimausasema. Jos pintaliimausasemaa ei ole, on kuivatusosiakin vain yksi. [7]

Paperia kuivataan pääasiassa monisylinterikuivauksella, jossa paperirainaa ajetaan kuumien kuivatussylinterien ympäri huuvan sisällä. Kuumat sylinterit haihduttavat paperista vettä huuvan sisälle, josta se imetään pois. Prosessi vaatii kuitenkin hyvin suuren laitteiston, sillä haihdutuskuivaus on hidasta. Tämän takia kuivatusosa onkin paperikoneen pisin ja kallein osa. Tämän takia kuivatusosan lyhentäminen ja energiatehokkuus ovat lisänneet mielenkiintoa tehokkaampiin konsepteihin [7]. Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen yksiviiraviennillinen monisylinterikuivatusosan etukuivain. Paperista haihtuu kuivatusosalla noin 1 % siitä vedestä, joka rainasta poistetaan paperin valmistuksen aikana. Silti sen energiankulutus on kaikkein suurin. Paperin kuivauksen hinta yksikköä kohden on viiran, puristimen ja kuivatusosan kesken on arviolta suhteessa 1:5:220. Suhteessa on otettu huomioon investointi, energian hinta ja käyttö [8].



Kuva 2. *Monisylinterikuivatusosa yksiviiraviennillä [11].*

Kuivatusosan päällä on huuva, joka eristää kuivatusosan tehtaan sali-ilmasta. Huuva pitää kuuman ilman ja höyryn sisällään, josta se voidaan imeä lämmöntalteenoton kautta pois. Tämä parantaa sekä kuivauksen tehokkuutta, että tehtaan yleistä energiatehokkuutta. Tehdassalin mukavuudesta puhumattakaan. Huuvan sisällä on hyvin kuuma, eikä siellä voi työskennellä koneen käynnissä olon aikana.

Monisylinterikuivatuksen lisäksi paperia voidaan kuivata yhdellä isolla, niin kutsutulla jenkkisylinterillä. Tämä on hyvin yleinen konsepti pehmopapereiden, kuten vessapaperin valmistuksessa. Jenkkisylinteri on vain yksi jättimäinen kuivatussylinteri, jonka pinnalla paperi kuivuu.

Päällepuhalluskuivaus on uusin tapa kuivata paperia. Päällepuhalluksessa käytetään tyypillisesti väliaineena ilmaa, jota puhalletaan kovalla nopeudella paperin pintaan. Puhallettu ilma haihduttaa paperista vettä, joka imetään höyryn ja ilman seoksena kuivaimen sisään ja ulos kuivaimesta. Päällepuhalluskuivatus sijoittuu puristimen taakse ja monisylinterikuivatuksen eteen. Tästä on etua, sillä kostea ja kylmä raina tarttuu herkästi kuuman kuivatussylinterin pintaan ja päällepuhalluksella rainan lämpötila saadaan nostettua tarpeeksi korkeaksi ennen sylinteriä, jotta se ei tartu kiinni. Päällepuhalluksella ei yleensä tehdä suoraan täysin kuivaa paperia, joten monisylinterikuivatus on tarpeen päällepuhalluksenkin kanssa. Päällepuhalluskuivain kuitenkin lyhentää sylinterikuivattimen pituutta huomattavasti, mikä näkyy investointikustannuksissa.

Sylinterikuivatuksessa kuivaus tapahtuu kuumilla sylintereillä. Sylinterit kuumennetaan syöttämällä niiden sisään höyryä. Jos höyry on tuotettu tätä varten, sitä kutsutaan tuorehöyryksi. Jos se puolestaan tuodaan jostain muusta laitteesta, puhutaan kierrätyshöyrystä. [12]

Sylinterikuivatus höyryllä on energiatehokas tapa kuivata paperia ja se sopii hyvin olemassa olevaan tehdasympäristöön [8]. Höyry syötetään kuivatussylinterin sisään, jolloin se alkaa lämmittämään sylinterin pintaa. Lämpö johtuu sylinterin pinnasta paperiin ja haihduttaa vettä paperista pois. Osa höyrystä lauhtuu ja sylinterin sisään tulee vettä, joka imetään pois sifoneilla. Myös höyryä imetään pois, jotta lauhtumista ei tapahtuisi liikaa. Se ja lauhde imetään eteenpäin lauhdesäiliöön, josta se ohjataan lauhduttimeen. Lauhdutuksen jälkeen vesi ohjataan kattilaan, jossa siitä tehdään taas uutta höyryä kuivatussylintereitä varten. [7]

Päällepuhalluskuivausta on myös tutkittu tulistetulla höyryllä. Sen etuna olisi korkeampi lämpötila ja tehokkaampi kuivaus [13]. Tulistettua höyryä voitaisiin myös kierrättää päällepuhalluskuivaimen läpi kuivatussylintereille, jolloin tehtaan energiatehokkuus paranisi huomattavasti. Tulistettua höyryä käyttämällä voisi olla mahdollisuus päästä hiilineutraaliin tuotantoon [2].

2.6 Jälkikäsittely

Jälkikäsittelylaitteet ovat pääsääntöisesti kuivauksen jälkeen tapahtuvaa käsittelyä varten. Ainoa poikkeus tästä on pintaliimausasema (engl. Sizer), joka on etukuivatusosan ja jälkikuivatusosan välissä. Muita jälkikäsittelylaitteita ovat kalanteri, päällystin, rullain ja leikkuri. [7]

Pintaliimaus parantaa paperin lujuusominaisuuksia ja se voidaan värjätä samalla. Päällystyskoneella puolestaan tehdään pintaan päällyste, joka levittää paperin pintaan sopivan määrän päällystysaineita. Päällysteet myös kuivataan päällystyskoneessa. Kalanterilla silotetaan paperia, säädetään sen paksuutta ja tasataan paksuusprofiili. Kalanterilla voidaan myös tehdä kuvioitua paperia ja kalanteroitu kartonki käy hyvin pakkausmateriaaliksi, koska siihen voidaan painattaa hyvälaatuisia kuvia. [7]

Lopuksi paperi rullataan rullaimella. Paperikoneesta suoraan tuleva rulla on paperikoneen levyinen ja paperia siinä voi olla jopa 90 km pituudelta. Tämmöisiä rullia on mahdotonta käsitellä tehtaan ulkopuolella, joten se on leikattava pienempiin, niin kutsuttuihin asiakasrulliin. Pituusleikkuri on tätä varten. Pituusleikkuri vetää isosta rullasta paperia ja leikkaa leveän paperin sopivan levyisiksi kaistaleiksi asiakkaan tarpeen mukaan ja rullaa tietyn mittaisen pätkän paperia hylsyn ympärille. Sitten paperi pakataan ja lähetetään eteenpäin. [7]

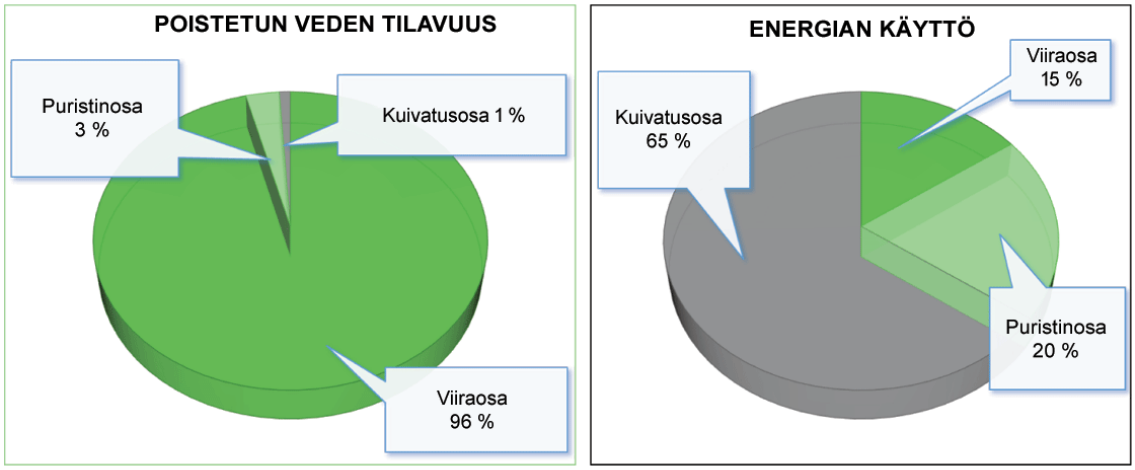
3. TULISTETTU HÖYRY

Tulistettu höyry (englanniksi superheated steam, lyh. SSD) on vesihöyryä, joka on kuumennettu kiehumispisteen yli. Normaalissa ilmanpaineessa veden kiehumislämpötila on 100°C, joten tulistetun höyryn lämpötila on enemmän kuin 100°C. Toisin kuin normaalissa kyllästetyssä höyryssä, tulistetussa höyryssä ei ole kosteutta. Vesipisarat erotetaan höyrystä tulistuksessa ja siksi se on hyvä väliaine kuivaamiseen. Tulistetun höyryn lämpötilalla ja paineella ei ole suoraa yhteyttä, joten sitä voidaan hyödyntää eri lämpötiloissa. Kyllästetyn höyryn aste määritellään paineella ja tulistusasteella. [14]

Tulistettua höyryä voidaan käyttää päällepuhalluskuivauksessa, jossa se on energiatehokkaampi tapa kuivata kuin kuuma ilma, sillä sen kierrättäminen on paljon helpompaa. Tulistettu höyry voidaan puhdistaa ja kierrättää tulistimen läpi uudelleen prosessiin. Kuivauksessa haihtunut vesi, eli höyry, voidaan tulistaa samalla kierrossa ja näin ollen prosessi syöttää itseensä lisää höyryä. Kuumalla ilmalla kuivatessa energiaa katoaa systeemistä, sillä ilma kostuu ja sitä on ohjattava prosessista ulos. Osa tulistetusta höyrystä voidaan myös ohjata höyryn lämmittämiseen, jonka ansiosta tulistetun höyryn energiankulutus voi olla 1000–1500 kJ per haihdutettu kilogramma vettä, kun vastaavasti kuumalla ilmalla kulutus on 4000–6000 kJ/kg. [15]

Tulistetussa höyryssä ei ole happea, jonka ansiosta se on laitteistolle ystävällinen eikä ruostuta. Samasta syystä se on myös hyvä väliaine herkästi hapettuvien aineiden kuivaamiseen. Ilman puuttuminen laskee myös tulipalojen ja räjähdysten riskiä, jolloin lämpötilan nostaminenkin on turvallisempaa. [14] [15]

Tulistetun höyryn kierrättämisen helppouden ja tehokkaamman kuivauksen takia se on houkutteleva väliaine paperikoneessa käytettäväksi. Kuten kuvasta 3 nähdään, kuivatusosa kuluttaa paperikoneessa eniten energiaa. Kuivatusosa on myös koneen kallein osa ja kuivatusosan pituus näkyy investointikustannuksissa myös tehdashallin pituudessa. Yksikin tehdashallimetri voi maksaa huomattavia summia, joten paperikoneen ja erityisesti kuivatusosan pituudella on merkitystä [12]. Tulistetun höyryn käyttäminen ja kierrättäminen on energiatehokas tapa laskea kuivatusosan energiankulutusta, sillä tulistettu höyry voidaan ohjata höyrykuivaimesta kuivatussylintereihin ja taas uudestaan tulistimen kautta kiertoon [12].



Kuva 3. *Paperikoneessa poistetun veden tilavuus ja energian käyttö rakenneosittain [7].*

Tulistetulla höyryllä kuivaaminen on investointina kalliimpi ilmakuivaukseen verrattuna, sillä se vaatii enemmän laitteita [15]. Tämän takia höyrykuivaimen kalliin hinnan on oltava pienempi kuin lyhyemmän paperikoneen ja energiatehokkuuden kasvun tuottaman säästön, jotta investoinnista saadaan houkutteleva [12]. Höyrykuivauksen käynnistäminen ja pysäyttäminen vie myös huomattavasti enemmän aikaa, kuin ilmakuivaimen käynnistäminen [15]. Tämän takia ratakatkon sattuessa tuotanto voi olla pysähdyksissä pidempään. Mutta toisaalta sylinterikuivatuksessa joudutaan odottamaan huuvan viilenemistä ja lämpenemistä joka tapauksessa, jolloin höyrykuivaimen ylös- ja alasajot eivät ole välttämättä merkityksellisiä [12].

Höyrykuivaimen tehokkuus ilmakuivaukseen verrattuna perustuu parempaan lämmönjohtavuuteen [14]. Tämän takia on hyvin tärkeää, että höyrykiertoon ei pääse ilmaa, sillä se aiheuttaa kuivaustehon laskua [12] [13]. Monesti tulistetulla höyryllä toimivat laitteet ovatkin suljettuja astioita, jotta ilma pystytään pitämään ulkona ja höyry sisällä [15].

4. TUTKIMUSONGELMA JA TUTKIMUKSEN TYYPPI

Tutkimuksen kohteena on tulistetulla höyryllä toimivan kuivaimen sisään- ja ulostuloaukkojen tiivistäminen, jotta kuivaimen sisällä oleva höyry ei vuoda tehdassaliin eikä ilmaa kulkeudu kuivaimen sisään heikentämään kuivaustehoa. Vastaavat laitteet ovat harvinaisia, eikä paperin kuivaukseen ole aiemmin löydetty kaupallistettua ratkaisua, joten tutkimuksessa tutkitaan vaihtoehtoisia ratkaisuja tiivistysrakenteelle.

Tutkimuksessa keskitytään erilaisten ratkaisujen analysointiin ja työn tavoitteena on tuottaa ehdotus tiivisteen jatkokehitystä varten. Tiivistyksessä keskitytään paperin sisääntuloaukon tiivistämiseen vaakasuoran viiran päällä, sillä kuivaimen rakennetta ei ole työtä tehtäessä päätetty lopullisesti. Sivujen tiivistämiseen on arvioitu olevan olemassa ratkaisuja, joita voidaan hyödyntää. Siksi sivujen tiivistämistä ei koettu mielekkääksi työn kannalta.

Sisään- ja ulostuloaukkojen tiivistäminen on aiemmin osoittautunut niin vaikeaksi ongelmaksi, ettei sitä ole pystytty ratkaisemaan. Tiivistämisestä haastavaa tekee paperin suuri nopeus, suurimmillaan 2000 m/min, sekä vaatimus siitä, ettei tiiviste koske paperiin. Paperin kuiva-ainepitoisuus on kuivaimelle tullessa liian matala, jotta siihen voitaisiin koskea. Paperi liikuttaa mukanaan rajakerrosta, joka on sisään tullessa ilmaa ja ulos tullessa tulistettua höyryä. Tämä ilmavirta ei saa päästä kuivaimeen sisään, sillä ilmapitoisuuden nousu laskee kuivaustehoa hyvin nopeasti. Toivottu ilmapitoisuus on alle 4 %. [12] [13]

Tutkimus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena taustaosuuksille. Empiirisessä osuudessa on pyritty hyödyntämään olemassa olevaa tutkimustietoa ja keksintöjä. Näistä ollaan yhdistely ideoita, joita mallinnettiin ANSYS Discovery -ohjelmistolla ja niiden toimintaa arvioitiin simuloimalla ANSYS Fluent -ohjelmistolla.

Tutkimuskysymyksinä työlle ovat:

1. Onko markkinoilla olemassa valmiita ratkaisuja, joita voitaisiin hyödyntää?
2. Millaiset olosuhteet tiivistyspaikassa on?
3. Millaista tiivistettä tai millaisia tiivisteitä kannattaisi tutkia ja jatkokehittää?

5. TIIVISTEIDEN SELVITYS

Tiivisteitä etsittiin verkkohaulla sekä avoimista lähteistä, että patenteista. Selvityksen aikana etsittiin myös relevantteja fysiikan ilmiöitä, joiden avulla tiivisteiden toimintaperiaatteita voidaan ymmärtää ja selittää. Näitä ilmiöitä pyrittiin myös hyödyntämään uusien ideoiden kehittämisessä.

5.1 Tiivisteiden teoria

Kontaktittomat tiivisteet eivät koske tiivistyskohdassa vastakappaleeseensa. Tällaiset tiivisteet eivät perustu pintojen välien sulkemiseen, kuten pullonkorkki tai o-rengas. Kontaktittomissa tiivisteissä on aina taustalla jokin fysiikan ilmiö, jota hyväksi käyttäen tiivistys saadaan aikaan.

5.1.1 Bernoullin laki

Bernoulllin laki on sveitsiläisen Daniel Bernoullin mukaan nimetty fysiikan laki, jonka Leonard Euler muokkasi nykymuotoon. Bernoullin lain mukaan virtauksen paine ja nopeus riippuvat toisistaan. Teorian mukaan putkessa virtaavan kokoon puristumattoman nesteen tai kaasun kokonaisenergia on vakio. Kun virtaavan aineen nopeus kasvaa, paine pienenee ja nopeuden pienentyessä paine kasvaa [16]. Bernoullin lakiin liity myös venturi-ilmiö, jonka mukaan virtauksen paine laskee, kun se kulkee putkessa kapeamman osuuden läpi.

Ilmiötä kuvaa Bernoullin laki, yhtälö (1), jossa p on virtaavan aineen paine, ρ on tiheys, U on nopeus, g on painovoima ja z on putken korkeus. [17]

$$\frac{p}{\rho} + \frac{U^2}{2} + gz = vakio \tag{1}$$

5.1.2 Virtauksen ominaisuuksia

Reynoldsin luku on dimensioton luku, joka on virtauksissa määräävä parametri. Reynoldsin luvun kasvaessa virtaus muuttuu laminaarisesta virtauksesta turbulentiksi. Reynoldsin luku pituuden suhteen lasketaan yhtälöllä (2), jossa ρ on virtaavan aineen tiheys, U on nopeus, L on virtauksen pituus pintaa pitkin ja μ on viskositeetti. [18]

$$Re_L = \rho UL/\mu \tag{2}$$

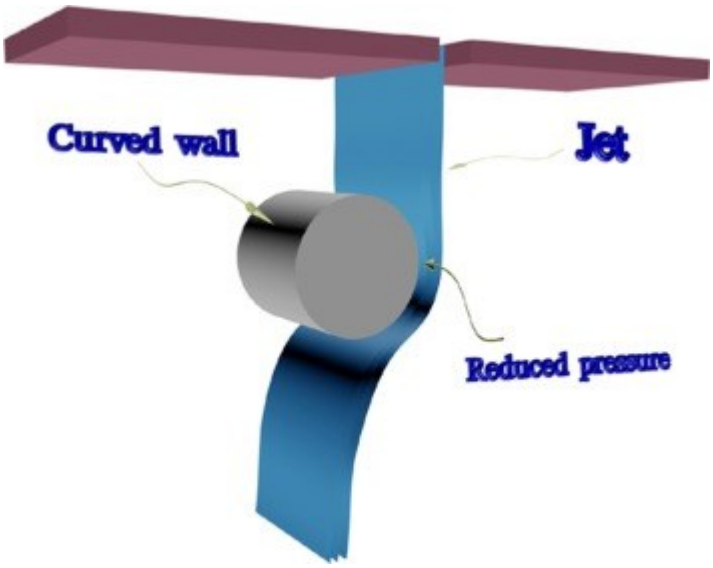
Reynoldsin luvun ollessa pieni, virtaus on laminaarinen. Laminaarisessa virtauksessa kerrokset eivät sekoitu, vaan kulkevat sileästi toistensa ohi. Reynoldsin luvun kasvaessa alkaa syntymään sekoittumista ja pyörteitä. Tällöin virtaus on siirtymätilassa, eikä ole

puhtaasti laminaarista eikä turbulenttista. Suuremmilla Reynoldsin luvuilla virtaus muuttuu turbulentiksi. Tällöin kerrokset sekoittuvat keskenään ja virtauksessa on pyörteitä. Reynoldsin luvun rajat riippuvat systeemistä eikä sille ole annettu yleisiä rajoja. Esimerkiksi putkivirtauksessa virtaus on laminaarista, kun Reynoldsin luku on pienempi kuin 2300 ja turbulenttia kun Reynoldsin luku on suurempi kuin 4000 [19]. Tällä välillä virtaus on siirtymätilassa. Pallon ympäri virtaavassa ilmassa sen sijaan laminaarinen virtaus tapahtuu Reynoldsin luvun ollessa alle 55 ja se on turbulenttia jo, kun Reynoldsin luku on yli 70 [18].

Ilmiö aiheuttaa virtauksiin rajakerroksen. Virtaukseen syntyy pyörteitä, kun se kulkee pinnalla, joka on karhea. Tämä aiheuttaa turbulenssia virtaukseen, joka saa aineen eri nopeuksilla liikkuvat kerrokset sekoittumaan toisiinsa. Kerrosten väliin syntyvät leikkausjännitykset vaikuttavat viereisten kerrosten nopeuksiin, jolloin nopeammin liikkuva aine vetää hitaammin liikkuvaa ainetta mukaansa. Turbulentissa virtauksessa pinnalla oleva kerros ei voi liukua ja siihen sovelletaan oletusta, että aineen ja putken nopeudet ovat samat siinä kerroksessa, joka on pinnan kanssa kosketuksessa. Rajakerroksen korkeutena pidetään yleensä 1 %:n tai 99 %:n sääntöä, jolloin rajakerroksen korkeus määräytyy sen kerroksen mukaan, joka kulkee joko 99 %:n nopeudella liikkuvan aineen nopeudesta tai 1 %:n nopeudella liikkuvan pinnan nopeudesta [20]. Sileää pintaa pitkin kulkevassa laminaarisessa virtauksessa puolestaan voi liukumista tapahtua pienillä Reynoldsin luvuilla [18].

5.1.3 Coandă-efekti

Coandă-efekti on romanialaisen Henri Coandăn mukaan nimetty fysiikan ilmiö, jonka mukaan virtaava aine seuraa kaarevaa pintaa. Teorian mukaan ilmiö johtuu siitä, että virtaava aine vetää paikallaan olevaa ainetta mukaansa ja aiheuttaa kaarevan muodon pinnalle alipaineen, joka vetää koko virtauksen pinnalle [21]. Ilmiötä voi havainnollistaa laittamalla valuvan hanan alle lusikan pohjapuoli veden virtauksen myötäisesti, jolloin veden virtaussuunta kaareutuu lusikan pohjan myötäisesti ja lusikan ohittaessaan jatkaa samassa suunnassa [22]. Kuva 4 havainnollistaa miten virtaus kaareutuu sylinterin ohi kulkiessaan. Siinä virtaava aine laitetaan kulkemaan aukon läpi ja sylinterin ohi. Virtaus kuitenkin pääsee koskettamaan sylinterin seinämää ja luo kosketuskohdan jälkeen alipaineen virtauksen ja sylinterin väliin. Tämä alipaine saa virtauksen kaareutumaan pinnan mukaan lyhyellä matkalla.



Kuva 4. *Havainnollistus coandă-efektin periaatteesta [23].*

5.1.4 Kerrostuminen

Kerrostuminen on ilmiö, jossa eri tiheyden omaavat aineet järjestyvät kerroksittain. Suuren tiheyden omaava aine painuu painavampana alaspäin ja matalamman tiheyden omaava aine nousee ylöspäin. Kuuma neste tai kaasu on useasti tiheydeltään matalampi, jolloin kuuma nousee ylös ja kylmä painuu alas. Kuuma höyry on ilmaa kevyempää, joten höyry nousee ylös ja ilma painuu alas.

Kerrostumista voidaan havainnollistaa helpoiten vedessä. Vedelle on ominaista, että se on tiheimmillään +4°C lämpötilassa [24], jonka takia järvet eivät yleensä jäädy pohjaa myöten. Toinen tapa havainnollistaa ilmiötä on ns. sokerisateenkaari, jossa eri väreillä värjättyihin vesiastioihin sekoitetaan eri määrä sokeria. Sokeri vaikuttaa veden tiheyteen ja kun eri väriset vedet lasketaan nousevassa tiheysjärjestyksessä varovasti koeputkeen, nähdään, että värit asettuvat päällekkäin eivätkä sekoitu [25], kuten kuvassa 5 näkyy.

Kuva 5. *Sokerisateenkaaret koeputkissa [23]*

5.2 Tutkimustieto

Tutkimustietoa haettiin avoimista lähteistä verkkohaulla, sekä tietokannoista. Tietoa ei löytynyt suoraan sovellukseen liittyen, mutta potentiaalisesti sovellettavaa tietoa löytyi jonkin verran. Tutkimustieto keskittyy pääasiassa pyörivien akseleiden tiivistämiseen.

5.2.1 Kirja – Seals and Sealing, Handbook

Robert Flitney esittelee kirjassaan, Seals and Sealing Hanbook [27], erilaisia tapoja tiivistämiseen. Kirja on tarkoitettu suunnittelijan tueksi, jotta uusia tuotteita suunnitellessa voidaan valita oikeanlaisia ratkaisuja tiivistykseen. Kirja sisältää tietoa staattisista tiivisteistä, kuten o-renkaista sekä pulttiliitosten tiivistämisestä. Kirjassa on myös paljon tietoa kontaktittomista tiivisteistä, joita käytetään monesti pyörivien akseleiden tiivistämiseen.

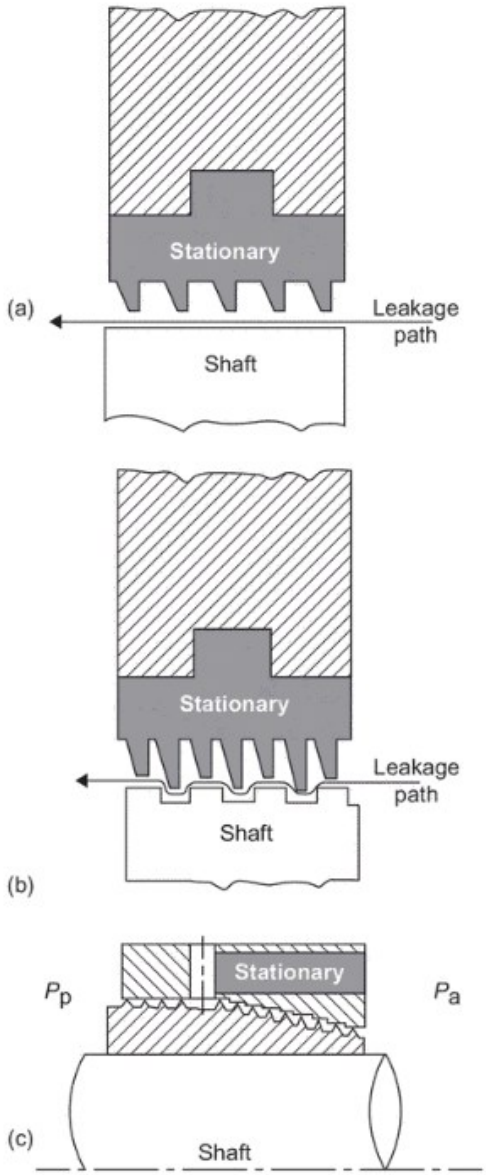
Kontaktittomien tiivisteiden etuna on matala tai olematon kitka, ne mahdollistavat suuret nopeudet, ne eivät juuri kulu, voivat puhdistaa itsensä ja niitä voidaan käyttää kontaktitiivisteiden kanssa yhdessä. Kontaktittomat tiivisteet voivat olla halpoja ja yksinkertaisia tai hyvinkin monimutkaisia esimerkiksi turbiineissa.

Kirjassa esitellään monta eri tapaa tiivistää pyörivä akseli. Labyrinttitiiviste on hyvä tiivistämään nesteitä. Kuvassa 6 esitellään erilaisia labyrinttitiivisteen komponentteja, joita voidaan käyttää yksin tai yhdistellä keskenään. Suurin osa niistä perustuu jollain tavalla keskipakoisvoimaan ja nesteen liikuttamiseen pois akselin ja rakenteen väliin jäävästä aukosta. Näistä yksinkertaisin on ns. ”Slinger ring”, joka on vain akselia leveämpi kiekko, joka estää nesteen liukumisen akselia pitkin eteenpäin ”heittämällä” sen sivulle. Tämä voidaan myös yhdistää rakenteeseen niin, että kiekon ja rakenteen väliin jää hyvin pieni aukko, jolloin neste ei voi kiertää akselin kiekon ympäri. Kirjassa esitellään vielä enemmänkin labyrintteja, joiden yhdistelmillä ja kontaktitiivisteiden yhdistelmillä voidaan saada aikaan hyviä tiivistyksiä.

Kirjan kappaleessa 3.6.2.3 esitellään turbiinilabyrinttejä, jotka sopivat kaasujen erottamiseen toisistaan. Näitä käytetään mm. kaasuturbiineissa, joissa akselin kulkee tilasta toiseen, joissa on erilaiset olosuhteet. Kaasuturbiineille tarkoitetuissa labyrinteissa tiivistykseen käytetyt kiekot tai hampaat voivat olla joko akselissa tai rakenteessa. Niiden toiminta perustuu painehäviöön, joka aiheutuu kiekkojen kiertämisestä, sillä kiekkojen ja akselin välissä on hyvin pieni rako. Näissä labyrinteissä akseli pakottaa kaasua ulospäin ja kuvan 7 a ja b tilanteissa kaasu joutuisi hampaiden väliin, jossa se jää pyörimään paikallaan. Labyrintit voivat olla joko ”straight-through” tai ”see-through” rakenteisia, joissa vuodon reitti on suora, tai ne voivat olla porrastettuja, kuten kuvassa 7 b ja c, jolla pyritään vaikeuttamaan kaasun kulkua. Porrastetun rakenteen vuoto on pienempi, mutta hinta on kalliimpi korkeampien valmistuskustannuksien takia.

Basic Function	Functional Element			Explanation
Rejecting	Collecting gutter and slinger ring			Avoiding direct splashing of liquids into the gap and their accumulation just in front of the gap entrance
Spraying-off	Slinger ring	Sealing chamber		Spraying-off the adhering liquid on the shaft (left) or diverting it (right)
Shielding	Slinger ring	Shield		Protecting the gap entrance and the flumes against direct splashing
Diverting				Preventing the liquid from proceeding and keeping it away from the output section
Throttling	1. Annular gap	2. Face gap	1. and 2.	Ingressing liquid is inhibited from proceeding by using narrow gaps
Back-pumping	Face gap	Beveled gap		Pumping back ingressed liquid actively while the shaft is rotating
Collecting	Sealing chamber	Collecting gutter		Collecting sprayed-off or drained-off liquid
Draining	Return channel	Suction pump		Liquid ingressed into the sealing chamber is drained off outwards (passive) or is pumped (active)

Kuva 6. *Erilaisia labyrinttitiivistetyyppejä [27].*

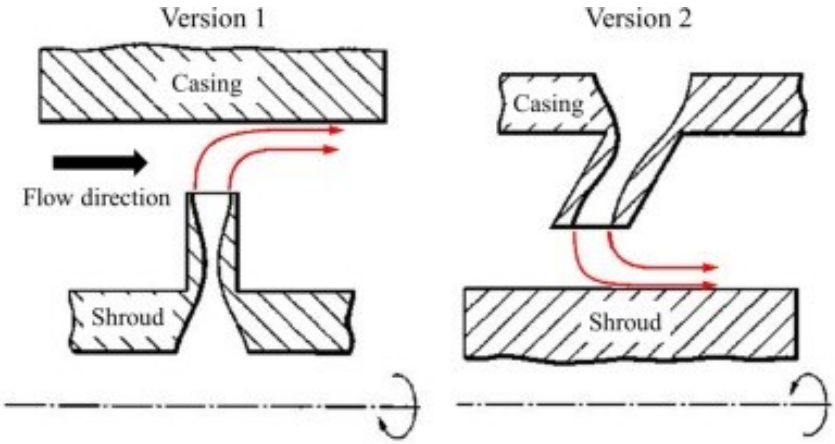


Kuva 7. *Turbiinilabyrinttityyppejä [27].*

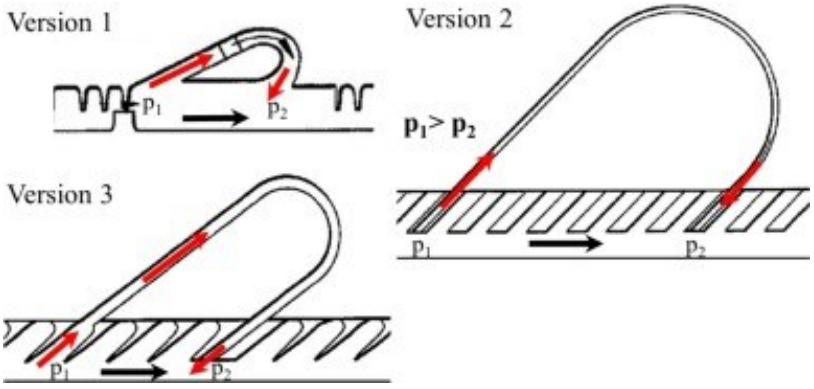
5.2.2 Tutkimus passiivisesta ilmaverhosta labyrintissä

Wasilczukin et al. tutkimuksen [28] aiheena on ollut ilmaverhon lisääminen turbiinilabyrinttiin. Tutkimuksen lähtökohtana on ollut joukko patentteja, joista kaksi patenttia nostettiin erikseen sille. Ensimmäinen on Rushtonin jättämä patentti [29], jossa labyrintin kynnen läpi on tehty puhallus. Toinen patenteista on Turnquistin et al. jättämä patentti [30], jossa kynsiin on sovellettu muokattua tesla-venttiiliä.

Kuvassa 8 on esitetty Rushtonin patentti [29], jossa puhallus tapahtuu kynsien läpi. Patentoidun keksinnön ideana on hidastaa virtausta labyrintin kapeimmissa kohdissa, joissa sen vaikutus on suurimmillaan. Puhallus voidaan tuoda keksijän mukaan joko rungosta tai erillisen suojuksen sisällä. Kuvassa 9 on esitetty Tesla-venttiiliin perustuvia Turnquistin et al. keksintöjä [30]. Tesla-venttiilin toiminta perustuu keksinnössä siihen, että kohdassa P_1, korkeapaineista kaasua ohjataan putkea pitkin alemman paineen, P_2, alueelle, jossa se puhaltaa virtauksen suuntaa vastaan. Tässäkin keksinnössä vastapuhallus on sijoitettu kynnen päähän, jolloin se on tehokkaimmillaan. Virtaus voidaan keksijöiden mukaan ottaa joko kynnestä tai kynsien välistä [28].

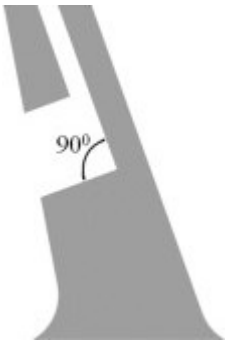


Kuva 8. *Kynteen sijoitettu puhallus [28] [29].*

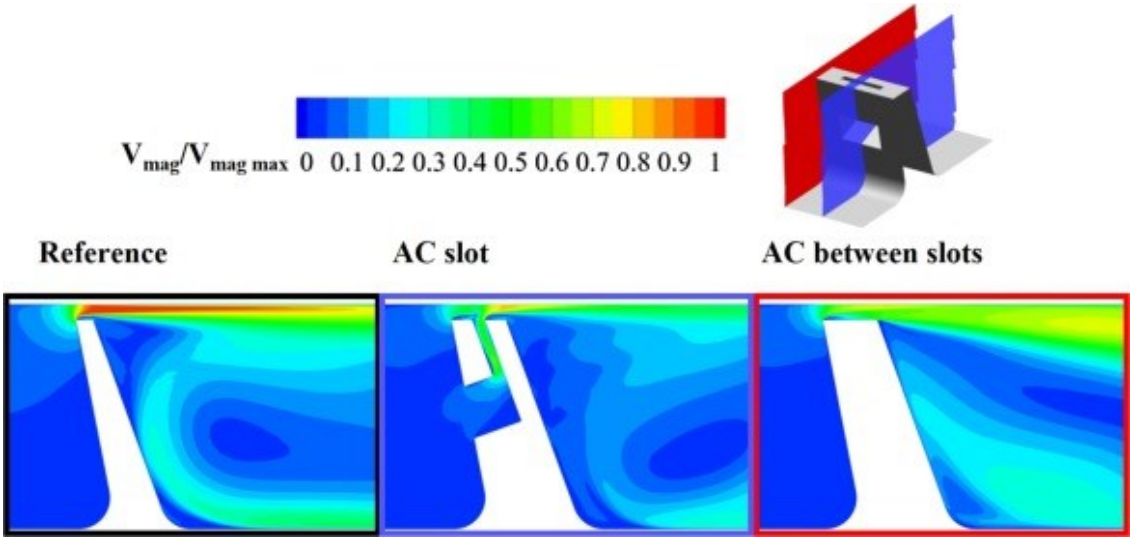


Kuva 9. *Tesla-venttiiliin perustuva ilmaverho [28] [30].*

Tutkimuksessa on tutkittu uutta ideaa, joka yhdistää nämä kaksi patenttia. Lopputuloksena on labyrinttitiiviste, johon tuleva virtaus käännetään hampaiden sisälle tehtyjen kanavien avulla itseään vasten. Tällöin tiiviste on täysin passiivinen eikä vaadi ulkoa tuotavaa energiaa tiivistyksen tehostamiseen. Wasilczukin et al. tutkimuksen mukaan virtausnopeutta voidaan alentaa jopa 15 %. Kuvassa 10 on esitetty tutkittu kynsimalli. Tästä nähdään, millainen kanava kynnen sisään on tehty. Kuvassa 11 puolestaan nähdään suhteutettu nopeuden alenema, joka kynsillä on saavutettu.



Kuva 10. *Labyrintin kynsi, jossa on vastapuhalluskanava [28].*



Kuva 11. *Tutkimuksessa tehtyjen simulointien tulos ja suhteutettu nopeuden alenema [28].*

5.3 Olemassa olevat ratkaisut ja niiden arviointi

Olemassa olevia ratkaisuja löytyi avoimista verkkolähteistä ja patenteista muutamia. Tämän lisäksi Valmetilla oli vanhoja keksintöjä edellisistä höyrykuivain projekteista. Näitä keksintöjä arvioitiin sen hetkisen parhaan ymmärryksen mukaan ja niiden toimintakykyä koitettiin arvioida.

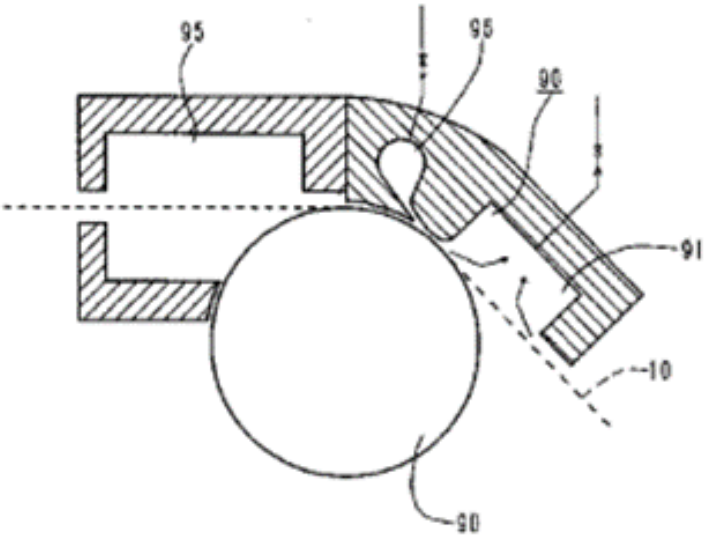
5.3.1 JUJO-Paper/Nippon Paper patentti

Patentit JPH09105580 (A) [31] ja JP3677662 (B2) [32]

Alun perin Jujo Paper Co Ltd.:n hakemassa patentissa vuodelta 1997 [31] kuvaillaan paperikoneen päällystyskuivaimen rakennetta. Tämä kuivain käyttää kuivaukseen tulistettua höyryä. Kuivaimen tiivistys on toteutettu kammioita, puhalluksia ja imuja hyödyntämällä. Paperirata kulkee kuivaimeen ilman viiraa, jolloin ilman sisään virtaus ja kondensaatio eivät ole ongelmia.

Kuivaimen tiivistyskyky perustuu puhalluksien ja imujen yhdistelyyn. Kuva 12 esittää paperin sisääntuloaukon rakenteen. Paperi (10) kulkee kuvassa oikealta vasemmalle. Paperi tulee ensin poistoimukammioon (91), joka pyrkii imemään rajakerrosilmaa pois paperin pinnalta. Suutinosio (96) puhaltaa rajakerrosilmaa pois paperin pinnalta. Virtaus kulkee coandă-pinnan kautta poistoimukammioon (96). Samassa kohdassa paperi tulee telalle (90), jolloin paperin alla oleva rajakerros ei pääse etenemään sisemmäs koneeseen. Telan (90) jälkeen paperi kulkee höyryntalteenottokammion (95) läpi kuivaimeen. [28]

Tämä esimerkki patentin monista eri kuvista on yksinkertaisin versio, joka tuo kuitenkin esiin hyvin kaikki erilaiset tilanteet ja periaatteet mitä kuivaimessa hyödynnetään. Kuivaimen toiminta saattaa myös perustua osittain kerrostumiseen, sillä lähes kaikki tiivisteet nostavat paperiradan ylös kuivaimeen tai tuovat sen alas kuivaimesta.



Kuva 12. *Kuivaimen sisääntulopään tiivistys [31].*

5.4 Inoue Kinzoku Kogyo patentti

JPH05106964 (B2)

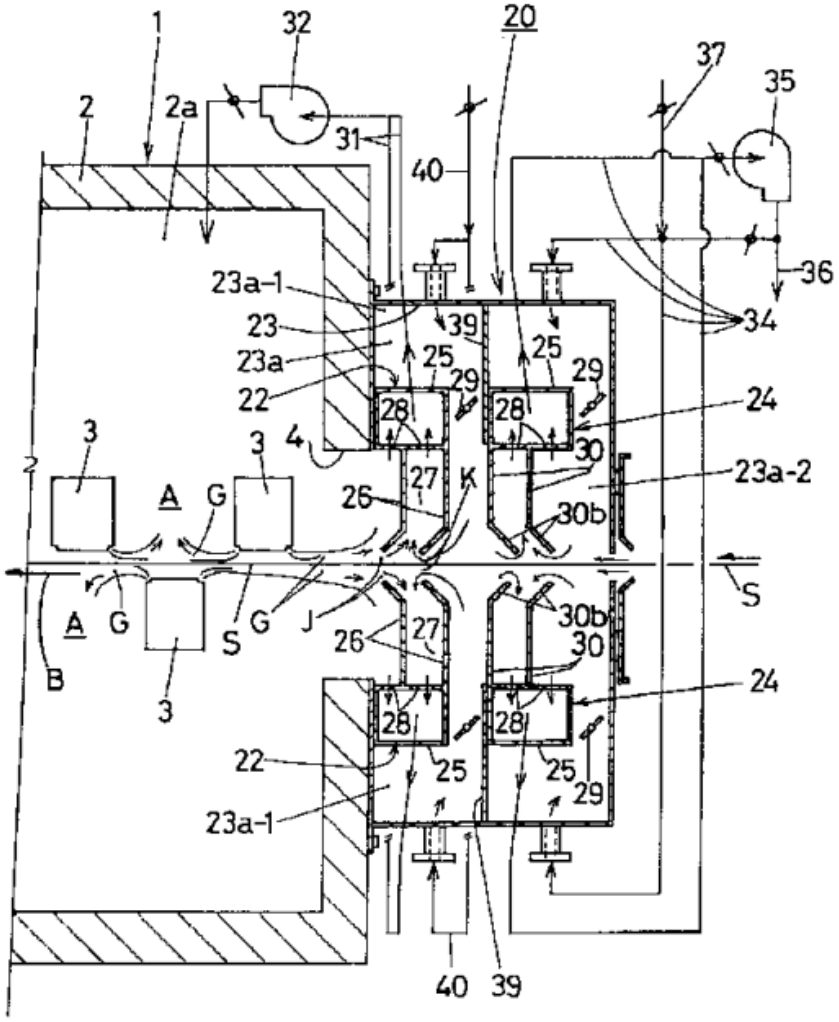
Inoue Kinzoku Kogyo on Japan Business Database:n mukaan japanilainen, Osakassa toimiva, yritys. Yrityksen toimiala on sivuston mukaan koneiden valmistus ja se tekee päällystämislaitteita paperille, filmille ja elektroniikalle sekä kuitukangaslaitteita. [33]

Patentti on vuodelta 1996 ja se kuvailee kuivaimen tiivistystä. Kuvassa 13 on esitetty havainnekuva kuivaimen sisääntulopuolesta. Paperi kulkee kuvassa oikealta vasemmalle. Itse kuivain on kuvassa vasemmalla ja se koostuu huuvasta (2), suuttimista (3) ja kaasunkierrätysjärjestelmästä (31 ja 32). Paperi kulkee tiivisteen läpi, joka koostuu erilaisista imuista ja puhalluksista.

Ensimmäisenä paperi tulee tiivisteen sisään aukosta, jonka kokoa voidaan oletettavasti säätää säätöpelleillä (ei numeroitu patentin kuvassa). Sisään tultuaan paperi on ulommassa tiivistyslaatikossa (23a-2), johon syötetään kaasua puhaltimella (35). Virtausta säädetään hanalla (29) laatikon sisällä. Tiivistyslaite (24) koostuu tiivistelevyistä (30) ja kaasunohjauslevyistä (30b). Levyt (30 ja 30b) ohjaavat kaasun virtauksen ylöspäin, josta se kulkee poistoaukkojen (28) läpi imukanavaan, josta puhallin (35) imee kaasun ja palauttaa kiertoon. [34]

Tiivistyslaatikon ulompi laatikko (23-a2) estää ulkoa tulevan kaasun pääsyn sisään. Sisempi laatikko (23a-1) puolestaan pitää kuuman kaasun kuivaimen sisällä. Sisemmässä laatikossa on sama idea, kuin ulommassakin, mutta suunta on toinen. Tiivistelevyt (27) osoittavat kuivaimeen päin ja ohjaavat kuivaimesta tulevaa ilmaa imukanavaan (31), josta se puhalletaan takaisin kuivaimen sisään puhaltimen (32) avulla. Laatikoiden väliin tuodaan kaasua kanavaa (40) pitkin, jota käytetään erottamaan kaasut toisistaan. Tätä kaasua päätyy molempiin imuihin ja se kiertää systeemissä. [33]

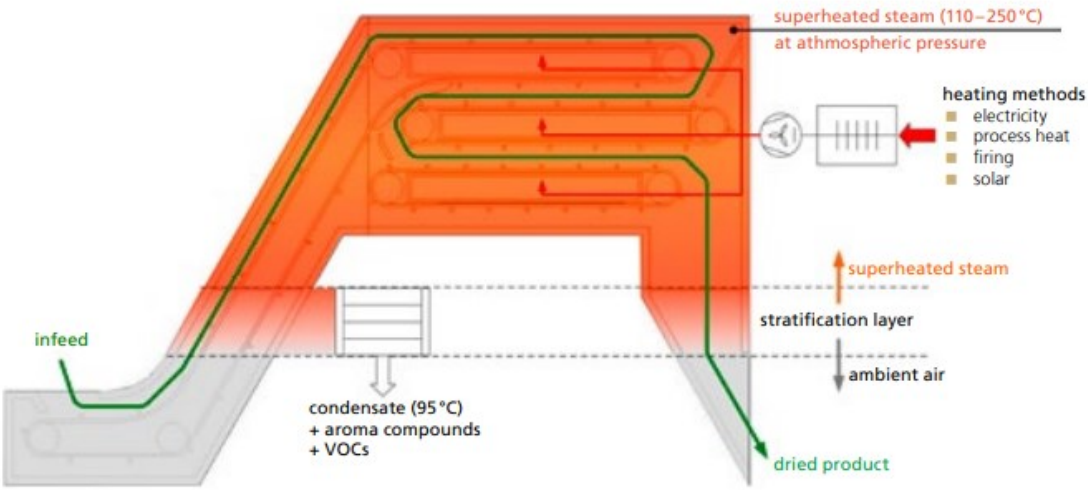
Patentin esittämän tiivistyksen toiminta perustuu siis siihen, että kuuman ja kylmän kaasun väliin tuodaan erottava kaasu, joka estää näiden sekoittumisen. Kaasuja imetään pois paperiradasta, jotta rajakerrosvirtaus saadaan hävitettyä ja estetään ulkoa tulevien kaasujen kulkeutuminen kuivaimen sisään. Kaasujen kierrätys tiivisteen sisällä ja kuivausväliaineen talteenotto ja takaisinkierrätys mahdollistavat energiatehokkaan tiivistyksen.



Kuva 13. *Kuivaimen sisääntulopuolen havainnekuva [34].*

5.5 Fraunhofer testilaitteisto

Fraunhofer IGB on saksalainen instituutti, joka tutkii faasirajapintoja ja bioteknologiaa. He kehittivät ruoan kuivaukseen testilaitteiston, jossa hyödynnetään kerrostumista ilman ja höyryn erottamisessa. Kuvan 14 mukaan ruoka-aineet tuodaan kuivaimeen vasemmalla olevan aukon kautta, josta ne kuljetetaan kuljettimella kuivaimen yläosaan. Kuljetuksen aikana ruoka-aineet nousevat höyryn ja ilman rajapinnan läpi ylös höyry-ympäristöön, jossa kuivaaminen tapahtuu. Kuljettimet siirtävät ruoka-aineita edestakaisin muutaman kerran ja tuovat ne alas, jossa ne siirtyvät höyryn ja ilman rajapinnan läpi alas ja kuivaimen oikeasta päädystä ulos. Kuivaimeen puhalletaan tulistettua höyryä, joka pyritään pitämään ilmanpaineessa. Höyryn ja ilman rajapintakerroksesta kerätään talteen 95°C:en lämpöistä kondensaatiovettä, aromiyhdisteitä ja haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. [35]

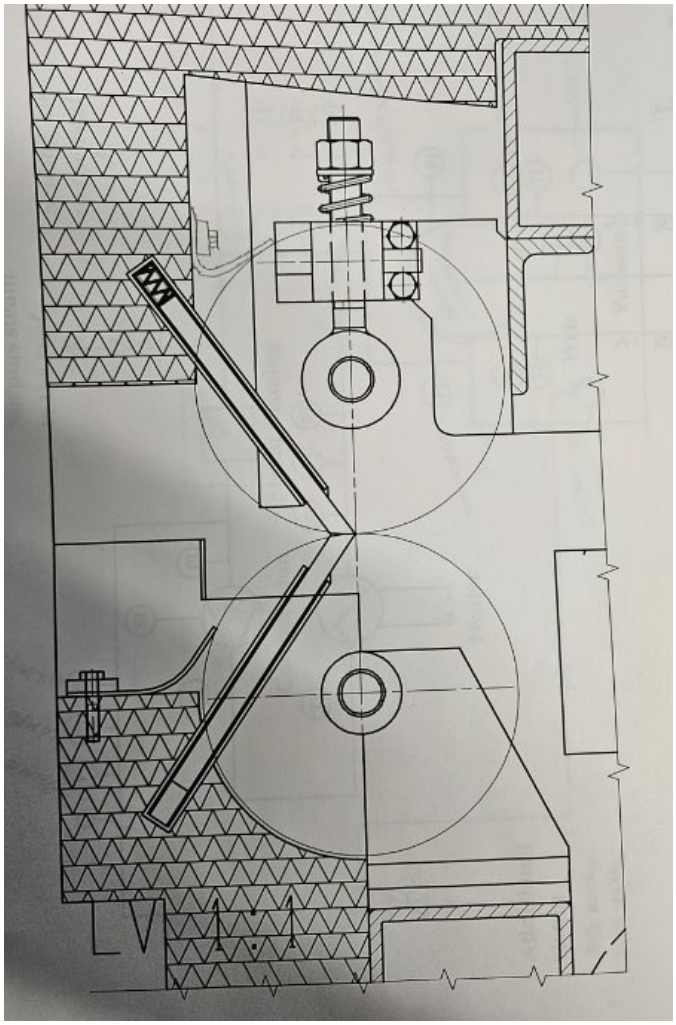


Kuva 14. *Fraunhofer testilaitteiston periaatekuva [35]*

5.6 Valmetin vanhat keksinnöt

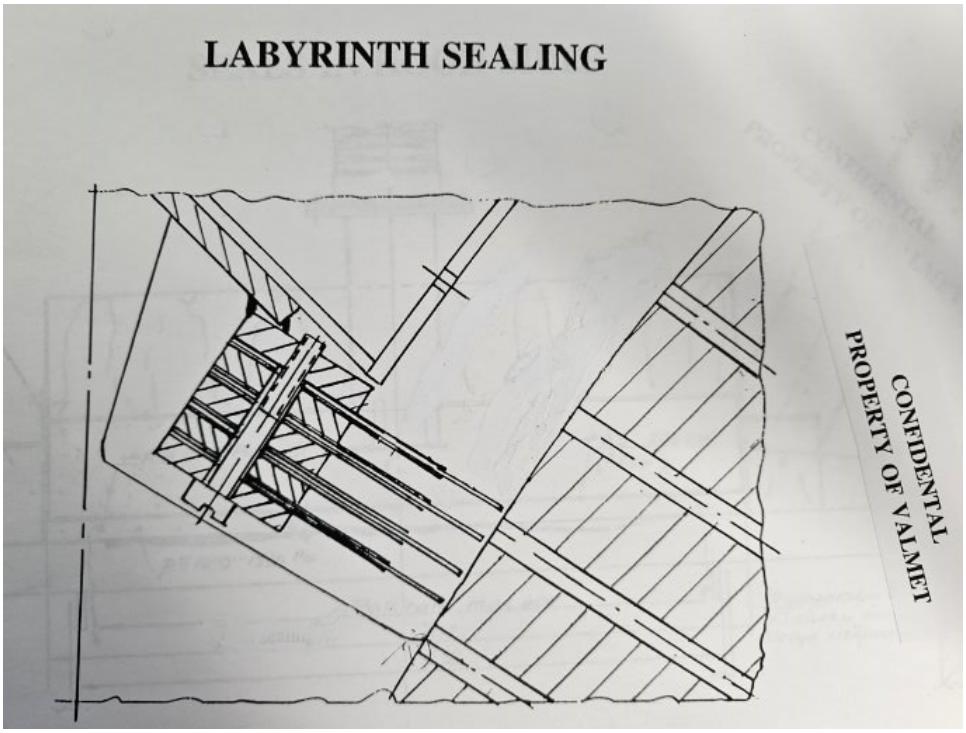
Valmet kehitteli edellistä testilaitetta varten tiivisteitä 1900-luvun lopulla. Tällöin tiivistämiseen ehdotettiin ratkaisuvaihtoehdoiksi labyrinttejä, höyryverhoja, höyrylaatikoita, huuvaa, imulaatikoita, imuteloja, portteja ja telaa. Näistä lupaavimmiksi koettiin labyrintin ja höyryverhon yhdistelmä ja sitä testattiin koelaitteessa. Tällöin ratkaisu ei kuitenkaan osoittautunut tarpeeksi hyväksi. Samoin telanippitiivistettä testattiin, eikä sekään toiminut tarpeeksi hyvin. [36]

Telanippitiivisteen idea on, että paperi kulkee kahden telan välistä. Kuvasta 15 nähdään, että alla oleva tela pysyy paikallaan ja pitää paperiradan paikallaan. Päällä oleva tela painaa jousikuormituksella paperia ja tiivistää aukon. Telan päädyissä on listat, joista alempi on kiinteä ja ylempi myös jousikuormitteinen. Telojen ympäri kulkevaa höyryä/ilmaa varten on asennettu laahaavat tiivisteet. [36]



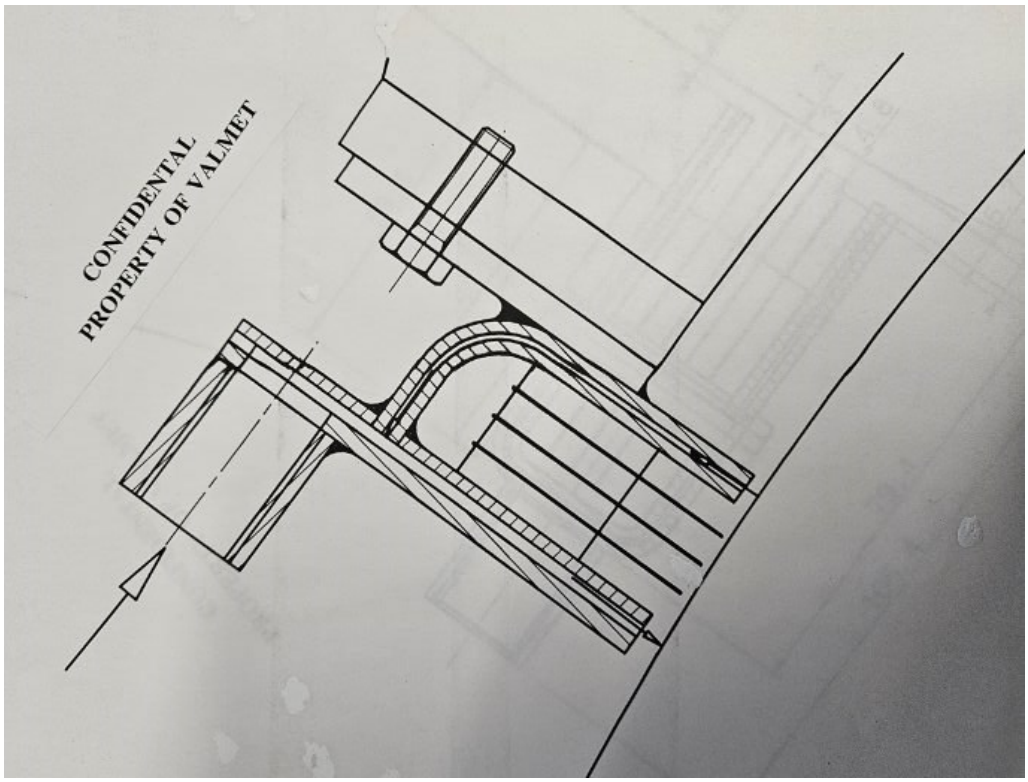
Kuva 15. *Telanippitiiviste [36].*

Labyrinttitiivisteisiin oli aikanaan kehitelty paljonkin eri variaatioita. Yksinkertaisimmillaan tiiviste olisi neljän peltilevyn muodostama labyrintti, joka asetettaisiin paperiradan pinnan lähelle. Tällainen tiiviste on kuvassa 16. Tiivisteen kai uskottiin toimivan pyörivän telan päällä parhaiten, sillä suurin osa kuvista on piirretty niin. Osassa hahmotelmista labyrintin levyt ovat eri tasoissa ja joihinkin on lisätty puhalluksia. [36]



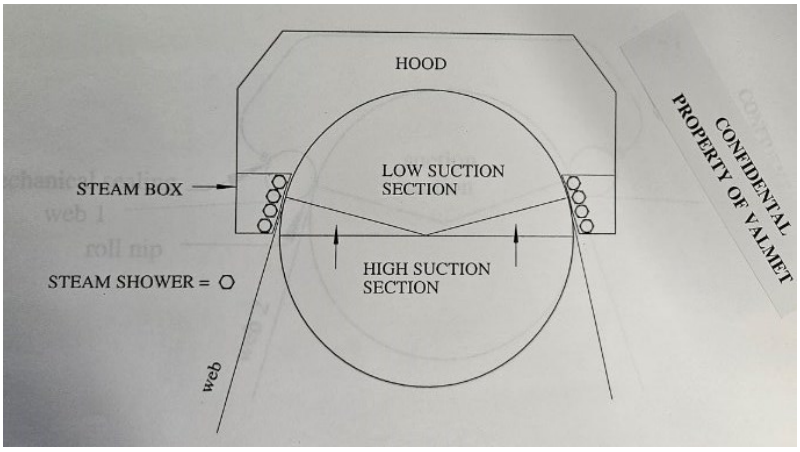
Kuva 16. *Labyrinttitiiviste [36].*

Kuvassa 17 esitetty tiivisteratkaisu yhdistää labyrinttiin sekä puhalluksen, että imun. Tiivisteen etupuolelta syötetään ilmaa tai höyryä, jolla luodaan verho tiivisteen eteen. Kanavien koosta päätellen puhallus hyödyntää venturi-ilmiötä. Puhalluksen eteneminen kapeaan rakoon aiheuttaa kanavaan alipaineen, joka vetää tiivisteen takaa ilmaa ja höyryä mukaan puhallusvirtaan.



Kuva 17. *Labyrinttitiiviste puhalluksella ja imulla [36].*

Muita ideoita tiivistämiseen oli pienet höyryhuuvat, jotka sijoittuvat telan päälle. Tällainen on kuvattu kuvassa 18. Huuvan tiivistäminen olisi tapahtunut rivillä höyryverhoja, jotka olisivat puhaltaneet paperin päälle sekä sisään-, että ulostulo puolilla. Huuvan sisällä olisi ollut tulistetulla höyryllä kuivaava höyry-ympäristö [36]. Tätä ideaa ei viety juuri tällaisena eteenpäin, mutta se poiki uuden tuotteen, nimeltään JetRun. JetRun on höyrypuhallin, joka niin ikään laitetaan telan päälle puhaltamaan paperiin kuumaa höyryä. Ero on siinä, että JetRun sijoitettiin kuivatusosan huuvan sisään, jossa se sai puhaltaa tulistettua höyryä ulos kuivaimesta [12].



Kuva 18. *Omalla pienellä huuvallaan toimiva kuivain [36].*

6. RAJAKERROSVIRTAUS

Rajakerros on virtauksen ominaisuus, joka syntyy virtaavan aineen ja pinnan välille, kun niiden välillä on liikettä. Rajakerros syntyy, kun aine ei pysty liukumaan pinnalla, jolloin pinnalla oleva aine kulkee samalla nopeudella seinämän kanssa. virtaavassa aineessa itsessään tapahtuu liukumista ja siksi sen nopeus muuttuu, kun siirrytään pinnalta etäämmäs. Rajakerroksen paksuutta arvioitaessa käytetään useasti raja-arvona 99 %:a rajakerroksen tai virtauksen huippunopeudesta [37]. On huomattava, että rajakerrosvirtauksiin ei voida hyödyntää Bernoullin lakia, sillä rajakerrosvirtausta määräävät viskoosit voimat [38].

6.1 Viirat

Viira on paperikoneessa käytettävä kudos, joka tukee paperirataa. Viirat valmistetaan nykyään muovifilamentteja yhteen kutomalla. Viiratyyppejä on mm. märkäviirat, puristinhuovat sekä kuivatusviirat. Märkäviiroja käytetään viiraosalla, jossa viiran päälle muodostetaan paperirata. Viirassa on oltava sopiva tiheys, jotta ilma ja vesi läpäisevät sen, mutta paperirata jää viiran pinnalle. Tämän takia märkäviirat ovat tiheitä, mutta läpäiseviä. [7]

Puristimella käytetään puolestaan vettä imeviä huopia. Paperi ajetaan kahden huovan välissä puristimeen, jossa vettä siirtyy nestepaine-eron takia huopaan. Huovasta vesi imetään viirakierron aikana imulaatikolla pois. Puristinhuovat ovat sileitä vedenpoiston käynnistämisen nopeuttamiseksi ja toisaalta myös paperin pinnan sileyden vuoksi, sillä puristinhuovan tekstuuri voi siirtyä paperiin.

Kuivatusviirat ovat myös muovifilamenttikudoksia. Kuivatusviiran on oltava hyvin läpäisevä, sillä kuivauksessa viiran läpi siirtyy höyrystyvää vettä. Kuivatusviirojen on oltava myös helposti puhdistuvia, hyvin ohjautuvia ja niiden on säilytettävä niiden avonaisuus. Kuivatusviirat siirtävät myös enemmän ilmaa mukanaan niiden avonaisuuden takia, mikä aiheuttaa lisähaasteita kuivaimen ilmapitoisuuden hallintaan. Viiran mukana tulee ilmaa sekä sen sisällä, että sen pinnalle muodostuvan rajakerroksen takia.

6.2 Viiran karheuden simulaattoriarvojen selvittäminen

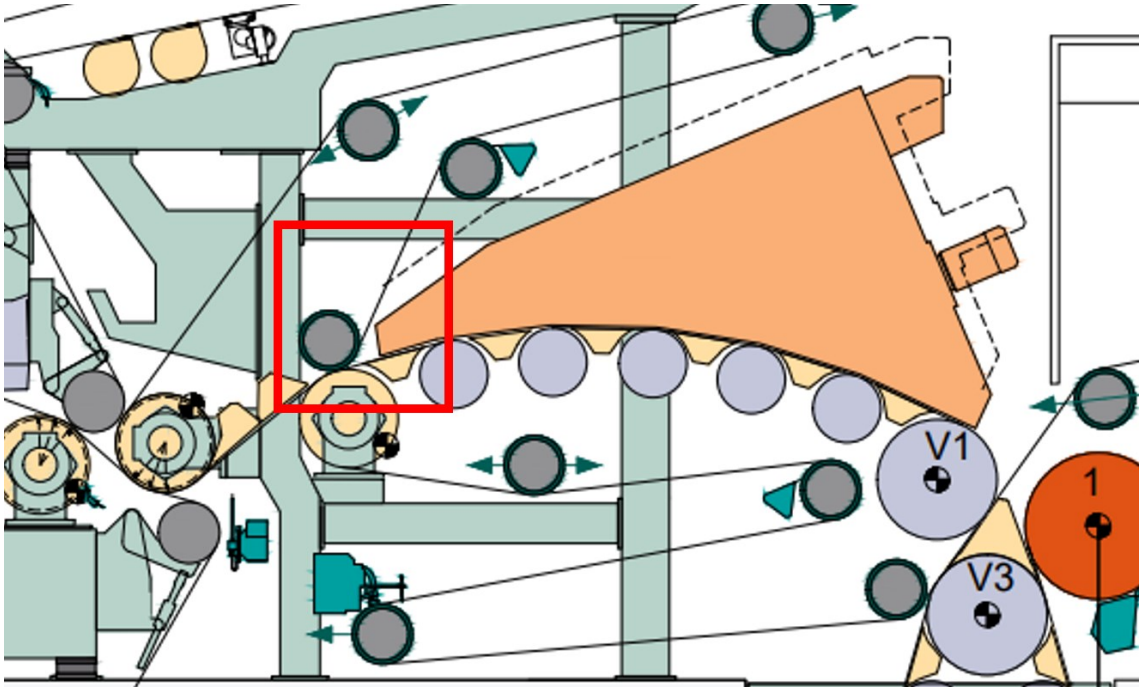
Ennen tiivisteiden simuloimista on selvitettävä, miten paperin mukana kulkeva ilmavirta käyttäytyy. Tätä varten alettiin selvittämään alkuarvoja virtauslaskennalla (engl. Computational Fluid Dynamics, CFD). Laskentaan käytettiin Ansys Fluent -ohjelmistoa ja 3D-mallin luomiseen Ansys Discovery -ohjelmistoa. Virtauslaskentaa varten tarvitaan paperin karheusarvot, eli ”Sand Grain roughness”. Ne määritellään kahdella parametrilla: ”Roughness Height” ja ”Roughness Constant”, eli karheuden korkeudella ja karheusvakiolla. Karheuden korkeus syötetään metreinä ohjelmistoon ja karheusvakio kuvaa karheuden säännöllisyyttä.

Karheutta lähdettiin selvittämään simuloimalla metrin leveää ja viisi metriä pitkää tasolevyä. Levyn päälle tehtiin metrin korkuinen laatikko, jossa oli metrin pituinen tyhjä osuus ennen levyn alkua. Kaikissa työn simuloinneissa on käytetty turbulenssimallina ANSYS Fluent -ohjelmiston k-omega SST-malleja ohjelmiston oletusarvoilla. Simuloinnin lopputuloksena löytyi karheuden arvo K_s.

7. TIIVISTEIDEN KEHITYS

Tiivistyksen lähtökohdaksi valittiin Valmetin OptiDry-kuivain, sillä höyrykuivainta ei vielä ollut olemassa [12]. Höyrykuivain tulisi sijoittumaan OptiDry:n tilalle, joten tiivistettäkin kehitettiin samalle geometrialle. Kuva 19 on erään OptiDry-koneen myyntikuvasta otettu leikkaus, johon on merkattu karkeasti tiivistystilanteen ensisijainen kehityskohde. Kuvassa käytetään värejä eri osien erottamiseksi toisistaan, ruskealla merkitään ilmalaitteita, joista tummemmalla ruskealla on OptiDry-kuivain. Harmaalla merkitään teloja ja turkoosilla rungostoa. Paperi kulkee viirojen mukana tällä alueella, joten paperia ei itse ole merkitty kuvaan, mutta viirat on piirretty mustilla viivoilla. Paperi kulkee kuvassa vasemmalta oikealle ja kuvan vasemmassa reunassa näkyy puristimen loppupää ja oikealla monisylinterikuivatusosan alkupää.

Puristimen ja OptiDry-kuivaimen välissä on siirtoviira, jolla paperi saadaan siirrettyä laitteiden välillä. Tämä luo OptiDry:n eteen aukeavan nipin, kun siirtoviira kulkee yläviistoon. Aukeava nippi luo puolestaan alipaineen.



Kuva 19. *OptiDry-kuivain myyntikuvassa [41].*

Kuivaimen sisäpaineeksi kaavailtiin aluksi ilmanpainetta, mutta myöhemmin tuli ajatus, että kuivaimen paine nostettaisiin 5000 Pascalin ylipaineeseen. Suuren ylipaineen tarkoitus oli pitää ilma ulkona kuivaimesta, mutta se olisi toisaalta myös aiheuttanut höyryn

karkaamista ja asettanut uusia vaatimuksia kuivaimen kehitykseen. Siksi kuivaimen sisäpaineessa päädyttiin myöhemmin arvoon 50 Pa [12]. Tästä syystä myös tiivisteiden kehityksessä jouduttiin kääntämään tiivistyssuuntaa kuivaimen sisään- ja ulostiivistyksen välillä.

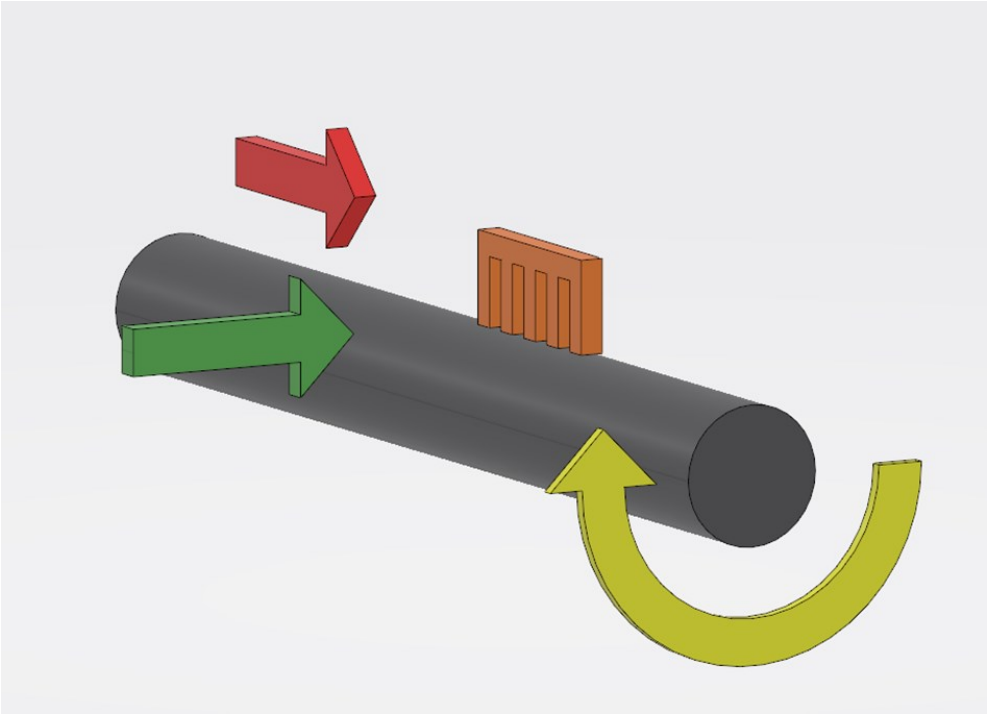
7.1 Aiempien ideoiden arviointi

Aiemmissa projekteissa uskottiin labyrintin ja nipin tiivistyskykyyn. Nippi voisi tiivistää radan hyvin, sillä telojen välissä oleva puristus pitäisi ilman ulkona. Tilanne on kuitenkin erilainen nykyisessä projektissa, sillä paperi tuodaan viiran päällä kuivaimeen, kun aiemmin sen oli tarkoitus kulkea yksin. Viiran sisällä pääsee siis ilmaa sisään ja samaan tapaan kuin puristimessa vesi, ilma pääsee viiran sisällä nipin ohi ja pahimmillaan purkautuu nipin puristuksen takia ulos viirasta ja suoraan höyry-ympäristöön.

Labyrinttitiivisteet toimivat todistetusti pyörivän akselin tiivistämiseen, kuten turbiineissa nähdään. Kuivaimen tilanteessa tiivistyssuunta on erilainen, sillä tela pyörii samaan suuntaan kuin koitetaan tiivistää. Kuva 20 havainnollistaa tilanteiden eroa. Turbiinissa tiivistyssuunta on punaisen nuolen suuntainen, jolloin oranssi labyrintti tiivistää kohteen akselin pyörimisen aiheuttaman keskipakoisvoiman ansiosta. Tässä tilanteessa kuitenkin tiivistyksen suunta on vihreän nuolen suuntainen, jolloin keskipakoisvoima ei pakota virtausta labyrinttiin.

Hypoteesi onkin, että labyrintti ei tiivistä juuri lainkaan itsekseen, vaan vaatii joko puhalluksen tai imun tai niiden yhdistelmän toimiakseen. Hypoteesi perustuu oletukseen, että viiran pinnassa liikkuva ilmamassa täyttää labyrintin ja luo sinne ilmapatjan. Jos näin käy, ilmapatjan ansiosta rajakerros pääsee virtaamaan esteettä labyrintin ja viiran välissä.

Labyrintti, jossa on puhallus ja/tai imu on lupaavampi keksintö. Sillä on potentiaali saada viiran mukana tuleva virtaus käännettyä tai heikennettyä niin, ettei se pysty tunkeutumaan viiran mukana kuivaimen sisään.



Kuva 20. *Tiivistyssuuntien havainnollistus.*

7.2 Uudet ideat

Uudet ideat perustuivat kehityksen alkuvaiheessa pääosin oletuksiin, että keskipakoisvoima saisi ilman irtoamaan pyörivän telan päällä radasta ja että kuivaimen sisäpaine pitäisi ilman ulkona. Myöhemmin kävi kuitenkin ilmi, että kumpaankaan oletukseen ei voi perustaa tiivisteideaa täysin. Siksi tiivistekehityksessä siirryttiin tutkimaan puhallukseen ja imuun ja niiden yhdistelmiin perustuvia ideoita. Pelkkä imu todettiin aika nopeasti myös epäsuotuisaksi vaihtoehdoksi, sillä se johtaa helposti tulistetun höyryn liialliseen menettämiseen. Puhallukseen perustuvia keksintöjä oli tehty aiemminkin ja patentitkin perustuvat lähes aina puhallusten ja imujen yhdistämiseen.

Ensimmäiset ideat perustuivat sisään tulevan ilman johtamiseen pois kuivaimesta. Nämä ideat perustuivat keskipakoisvoimaan ja ilmavirtauksen ohjaamiseen erilaisilla labyrintin kaltaisilla säleiköillä. Arvaus oli alkuvaiheessa se, että tällä tavoin kuivaimen sisääntuloaukolle voitaisiin aiheuttaa niin suuri painehäviö viiran pinnalle, ettei viiran mukana tuleva ilma voisi voittaa kuivaimen sisäpainetta, jolloin kuivaimen ja tiivistesäleikön väliin voitaisiin tehdä kammio, jossa ilma ja höyry voivat sekoittua, mutta pysyvät tasapainossa.

Ideat jalostuivat eteenpäin labyrinttitiivisteeseen, jossa olisi imu. Tässä idea perustui edelleen oletukseen, että kulmaan asetetut säleiköt voisivat irrottaa rajakerrosvirtauk-

sesta tarpeeksi ilmaa, että painehäviö saadaan aikaan. Sen sijaa, että pelkästään tasapainoon asettuva tiivistyskammio pitäisi sisään tulevan ilman ulkona, lisättiin labyrinttiin imu. Sen tarkoitus olisi auttaa kammiota ylläpitämään tiivistyskykyä ja antaisi mahdollisuuden säätää tiivisteen toimintatehoa.

Pelkkää sekoituslaatikkoakin pohdittiin. Sen idea perustui pelkästään siihen, että täsmättäisiin kuivaimen sisäpaine niin, että laatikon sisällä voitaisiin ylläpitää tasapainotilannetta, joka pitäisi ilman ulkona. Tästä oli myös variaatio, jossa oli useampi laatikko ja jokaisen laatikon välissä seinä, joka olisi hyvin lähellä viiraa. Tämän idean taustalla oli Bernoullin lain mukainen ajatus siitä, että painehäviötä voitaisiin aiheuttaa pienillä aukoilla viiran pinnan ja laatikon seinien välillä.

Myös Coandă-efektiin perustuvia tiivisteitä hahmoteltiin. Coandă-efekti on turbulentissa virtauksessa vahvempi, kuin laminaarisessa virtauksessa, jolloin sen teho voisi olla merkittävämpi. Näidenkin tiivisteiden ideana oli ohjata sisään virtaavaa ilmaa muualle.

Rajakerrosvirtauksen heikentäminen tai höyryksi muuttaminen olivat ideoita, jotka pohjautuivat siirtoviiran nipistä kuivaimeen asti ulottuvaan laatikkoon. Höyrypuhalluksilla voitaisiin täyttää aukeavan nipin tuottama alipaine, joka imee normaalisti ilmaa. Laatikon sisällä olisi suoraan nippiin puhaltava höyrypuhallus, joka täyttäisi laatikon höyryllä ja sarja höyryverhoja, jotka nostaisivat samalla radan lämpötilaa ennen kuin se saapuu varsinaiseen kuivatukseen.

7.3 Simulointiin valittavat tiivisteet

Simulointiin valittiin tiivisteitä pääosin hypoteesien perusteella ja mielenkiinnon mukaan. Labyrinttitiiviste oli vanhoissa ideoissa ja kirjallisuudessa niin yleinen, että sitä haluttiin testata, vaikka hypoteesin mukaan se ei toimisi. Labyrinteistä valittiin muutama eri variaatio testattavaksi. Pääasiassa näissä kiinnosti nähdä, että toimiiko labyrintti telan päällä ja saadaanko niissä venturi-ilmiötä aikaan käyttökelpoisilla ajoparametreilla.

Nipistä alkava höyrylaatikko karsittiin pois, koska sitä pidettiin hankalana toteuttaa ja kalliina rakentaa. Samoin JUJO Paperin ja Inoue Kinzoku Kogyo:n patenttien mukaiset ideat koettiin liian isoiksi ja raskaiksi keksinnöiksi, että ne karsiutuivat pois simuloinneista

Ennen varsinaisia simulointeja tehtiin joukko hyvin matalan tason simulointeja eri konseptien haarukoimiseksi. Näissä simuloinneissa karsittiin nopealla tahdilla eri ideoita ja pelkkään imuun perustuvat tiivisteet karsittiin näillä simuloinneilla ulos varsinaisesta tar-

kastelusta. Ilmaa viiran pinnalta pois ohjaavat tiivisteideat karsiutuivat myös pois nopeasti näissä simulaatioissa, sillä siinä huomattiin rajakerroksen alittavan tiivisteet lähes aina eikä tällaisista tiivisteistä ollut hyötyä.

7.4 Simulointiasettelun esittely

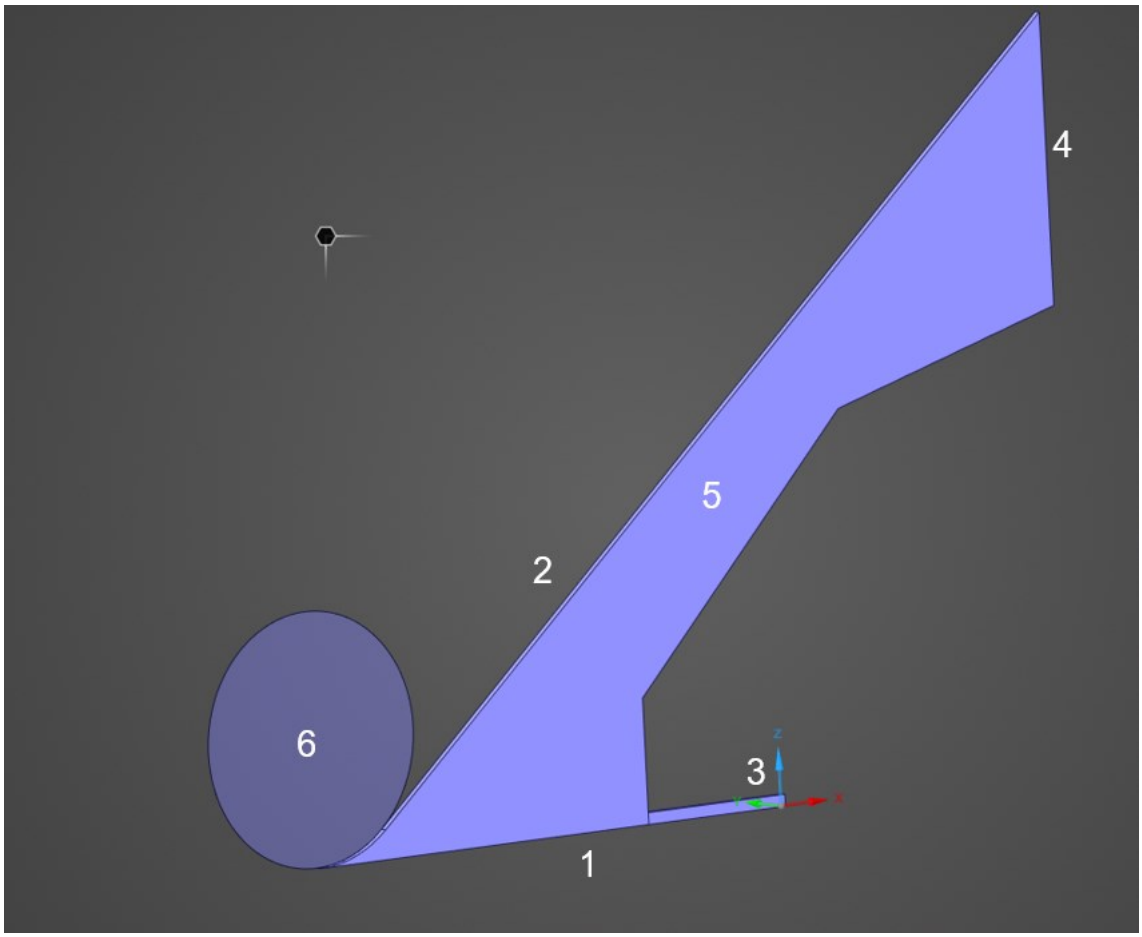
Keksittyjä tiivisteitä hahmoteltiin ja simuloitiin Ansys Fluent -ohjelmistolla. Tätä varten luotiin 3D-mallit Ansys Dicovery -ohjelmistolla. Kuvassa 21 on OptiDry-kuivaimen geometrian mukainen, 20 mm leveä, malli karkeasti kuvan 19 rajauksen mukaisesti, jossa virtaavan aineen tilavuus on mallinnettu. Kuva 19 muoto ja mitoitus ovat suuntaa antavia, eivätkä vastaa täysin oikean kuivaimen mittoja. Geometriassa on jätetty huomiotta paperiradan alla olevat laitteet sekä aukeavaa nippiä edeltävät laitteet. Kuvaan 21 on numeroitu eri osat pinnoille: 1 on paperi, 2 on siirtoviira, 3 on kuivaimen puhallus, 4 on simulointialueen pääty, 5 on simulointialueen kylki ja 6 on siirtoviiran tela. Loput nimeämättömät pinnat toimivat simulaattorissa seininä. Kuvassa ei näy, mutta osa 3 käsittää kuivaimen pohjan lisäksi simulointialueen päädyn myös. Kuivaimen etuosassa, osan 3 alueella, on myös 200 mm pituinen kaistale, jolla ei ole puhallusta, vaan seinää. Kaikkien pintojen reunaehdot on lueteltu taulukossa 3.

Simulaattorissa on siis tarkoitus tutkia 20 mm leveän kaistaleen käyttäytymistä paperikoneen leveyssuunnan keskellä. Kapean kaistaleen simuloinnin etu on nopeampi laskenta ja helpompi tulosten arviointi. Tällaisen lähes kaksiulotteisen simuloinnin haittapuolena on kuitenkin sen epätarkkuus [40] [41]. Simulointiin on kaksi eri näkemystä, jotka tuottavat erilaisia lopputuloksia.

Pauli Losoin [40], näkemyksen mukaan alueen 5 reunaehtona voitaisiin käyttää inlet/outlet -ehtoja, jotka mahdollistaisivat virtaavan aineen vapaan virtauksen kyljistä ulos. Tälle perusteena olisi ajatus, että tämä osuus aineesta on tehtaan vapaassa sali-ilmassa ja näin ollen voisi liikkua vapaasti myös sivusuunnassa. Kuivaimen alle hän ehdotti symmetria reunaehtoa, koska ilma ei voi liikkua kuivaimen sivuilta ulos.

Toisen näkemyksen esitti Timo Siikonen [41]. Hänen mielestään simulointialueen kylkien, eli koko osuuden 5, tulisi olla symmetria reunaehdolla, jotta sivuttaisvirtausta ei synny. Hänen näkemyksensä mukaan sivuttaisvirtausten mallintaminen näin kapealla kaistaleella olisi epätarkkaa ja johtaisi vääriin tuloksiin.

Molemmat asiantuntijat olivat yhtä mieltä siitä, että kuivaimen puhallusta, 3, voidaan mallintaa pressure-inlet-reunaehdolla ja simulointialueen päädyssä, 4, voidaan käyttää inlet/outlet -reunaehtoa. Itse tiivisteille molemmat ehdottivat myös symmetria reunaehtoja. [40] [41]



Kuva 21. *OptiDry-kuivaimen geometria.*

Taulukko 1. *OptiDry-kuivaimen geometrian selite ja käytettävät reunaehdot.*

Numero	Selite	Reunaehto
1	Paperi	Liikkuva seinä
2	Siirtoviira	Liikkuva seinä
3	Kuivaimen puhallus	Sisääntulo, paine
4	Simulointialueen pääty	Ulostulo, paine
5	Simulointialueen kyljet	Symmetria tai sisään-/ulostulo
6	Siirtoviiran tela	Ei mukana simuloinnissa

Tähän simulaatiomalliin lisättiin erilaisia tiivisteitä ja tutkittiin niiden toimintaa. Simulaatioissa pääpaino oli tuotantokoneille tarkoitettujen tiivisteiden kehityksessä, jolloin paperin ja viiran nopeudeksi asetettiin 1500 m/min, eli 25 m/s.

8. SIMULOINNIN TULOKSET

Tavoitteena oli haarukoida potentiaalisia tiivisteratkaisuja, joten myös simulointia ja tulosten arviointia yksinkertaistettiin. Sen sijaan, että tutkittaisiin tarkkoja ilmapitoisuuksia, tutkittiin lämpötilojen sekoittumista, sillä sen koettiin antavan tarpeeksi suuntaa antavia tuloksia. Ilmapitoisuutta arvioitaisiin vasta kehityksen seuraavassa vaiheessa, kun laskentaan on käytettävissä parempia laitteita ja asiantuntijoita. Suurin osa tuloksista on esitetty lopputuloksina, kun puhallusten nopeudet ja kuivaimen sisäpaine on säädetty parhaimmalla sen hetkisellä tiedolla tiivistämään kuivainta.

8.1 Kylkien reunaehtojen vaikutus tuloksiin

Alustavia simulointeja suoritettiin kahdella tavalla kylkien reunaehtoa vaihtaen. Kylkien reunaehto oli joko outlet, joka salli virtauksen kumpaankin suuntaan tai symmetria. Outlet reunaehdolla tiivisteet toimivat hieman paremmin ja alhaisemmilla puhallusnopeuksilla, sillä virtaus ei jäänyt pyörimään vapaaseen tilaan tiivisteen ja siirtoviiran väliin. Sen sijaan symmetriareunaehdolla ilma ei päässyt virtaamaan sivuille ja viiran liike sai ilmavirran pyörimään vapaassa tilassa.

Outlet-reunaehdolla simuloidessa tuloksiin jäi kuumia ratakäyriä sali-ilmaan, mitä ei pitäisi tapahtua. Näitä pystyttiin vähentämään laskemalla enemmän kierroksia, mutta edes 3000 laskentakierroksen jälkeen nämä kuumat ratakäyrät eivät hävinneet. Vapaa sali-ilma pääsee tässä tapauksessa liikkumaan sivuille ja simuloinnin tuloksia tarkastellessa huomattiin, että sivulle virtaavat ratakäyrät kääntyvät epäsymmetrisesti ja näennäisesti sattumanvaraisesti jommallekummalle puolelle.

Symmetria-reunaehdolla simuloidessa sen sijaan jo 500 laskentakierroksella päästiin eroon kuumista ratakäyristä sali-ilmassa. Simulointeja verratessa ei tiivistyskyvyssä kuitenkaan näy olennaista eroa. Selkein ero on siinä, kuinka rajakerrosilma tulee viiran päälle outlet-reunaehdolla sivuilta ja symmetriareunaehdolla ilma tulee viiralle kuivaimen etureunaa pitkin, josta se lähtee molempien viirojen mukaan aiheuttaen tiivisteen etupuolelle pyörteen.

Loput simuloinnit tehtiin käyttäen kyljissä symmetria reunaehtoa, jotta käytetään haastavimpia olosuhteita ja laskenta on tarkempaa ja nopeampaa.

8.2 Tiivisteiden simulointi

Pelkkä labyrinttitiiviste käyttäytyi kuten arveltiinkin. Labyrintti täyttyi ilmasta ja salli altaan läpivirtauksen. Tiivisteen sisälle syntyy pyörteitä, jotka pyörivät itsekseen tiivisteen sisällä, mutta eivät aiheuta olennaista häiriötä sisään virtaukseen. Ilma kulkee selkeästi kuivaimen sisälle päin. Simuloinnissa huomattiin, että labyrintin sisällä oleva ilma liikkuu hitaasti verrattuna rajakerroksen nopeuteen.

Rajakerros madaltuu hieman labyrintin alla ja pyörteen nopeus labyrintin etuseinämässä on nopea, josta voidaan päätellä labyrintin kuitenkin leikkaavan rajakerrosvirtausta hieman. Labyrintin etuseinämän alareuna on myös hieman korkeammalla kuin muiden, joka aiheuttaa toisen leikkaantumisen seuraavan säleen kohdalla. Se ei aiheuta kuitenkaan yhtä suurta nopeutta säleiden välisiin pyörteisiin, kuin seuraavat säleet aiheuttavat.

Labyrintin, puhalluksen ja venturi-ilmiön yhdistelmästä löytyi hieman potentiaalia telan päällä. Venturi-ilmiön ansiosta imu saadaan toimimaan labyrintin jälkipuolella. Tiivistyspuhallus ohjautuu kapeaan kanavaan, jossa virtauksen nopeus kasvaa. Tällä saadaan aikaan venturi-ilmiö, joka imee kuivaimen puolelta höyryä kanavaan.

Tiiviste on simulaattorissa stabiilin näköinen, eikä vuoda kuumaa höyryä ulos juurikaan. Tämä kuitenkin saavutettiin vasta, kun kuivaimen sisäpaine nostettiin liian korkealle ja tiiviste on liian lähellä viiran pintaa. Tiivisteratkaisun etuna olisi myös se, että tiivistepuhallus voisi olla ilmaa.

Kun sama tiiviste tuotiin vaakasuoralle viiralle, huomattiin, että sen tiivistyskyky heikkenee huomattavasti. Tiivistettä testattiin kahdella eri etäisyydellä kuivaimen sisäpainetta nostamalla. Tällä yhdistelmällä saatiin taas venturi-ilmiö toimimaan, mutta tiiviste vuotaa kuumaa höyryä ulospäin. Tiiviste onnistui kuitenkin pitämään tulistetun höyryn kuivaimen sisällä.

9. VAIHTOEHTOISET RATKAISUT

Vaihtoehtoiset ratkaisut höyrykuivatukseen jäivät vähäisiksi. Ideoinnissa keskityttiin pääasiassa kerrostumisen hyödyntämiseen. Asiantuntijat osoittivat kuitenkin hyvin nopeasti, ettei tällaiset konseptit voisi toimia [12]. Ideoissa toistui monesti se ongelma, että paperi on pidettävä viirassa kiinni joko imun tai toisen viiran avulla. Toinen viira heikentää kuivatuksen tehoa ja imutelat imisivät tulistetun höyryn pois höyrytilasta liian nopeasti tai käytettävän höyryn määrän pitäisi olla hyvin suuri. Näistä syistä ideoita ei viety pidemmälle.

Tällaisen kuivaimen idea olisi tuoda paperi suljettuun kuivaimeen, jossa olisi pysyvä höyry-ympäristö ja jonka sisällä käytetään omaa viiraa. Kerrostumisessa olennaista olisi se, että paperi tuotaisiin kuivaimeen alhaalta ylös. Tämä vaatii siirtoviiran, joka ottaa puristimelta radan ja kuljettaa sen höyrykuivaimen alle. Kuivaimen alla paperin suunta pitää muuttaa ylöspäin, johon tarvitaan imutelaa. Tämän jälkeen paperi kulkisi kuivaimen sisään, josta se siirrettäisiin kuivaimen sisällä pyörivälle viiralle. Kuivaimen sisällä pyörivän viiran etu olisi se, että sen lämpötilan voisi pitää aina vähintään 100 °C lämpötilassa. Tällöin viira ei aiheuttaisi kondensoitumista kuivauksessa, eikä näin ollen laskisi kuivaustehoa. Idea todettiin kuitenkin toimimattomaksi, sillä se vaatisi kuivaimen sisällä imuteloja.

10. YHTEENVETO

Työn alussa tutustuttiin tulistetun höyryn ominaisuuksiin ja fysiikan ilmiöihin. Käsiteltiin mitä tulistetulla höyryllä kuivaaminen tarkoittaa ja miten sen käyttö eroaa höyryllä tai ilmalla kuivaamisesta. Fysiikan ilmiöiden ja lakien käsittelyllä luotiin pohjaa, jonka avulla tiivisteitä pyrittiin arvioimaan ja kehittämään.

Empiirinen osuus pohjautui patenttien ja vanhojen piirustusten tulkintaan ja analysointiin, joista parhaimman näköiset keksinnöt vietiin simulaattoritarkasteluun. Simulaattoritarkastelu suoritettiin ANSYS Fluent -ohjelmistolla ja 3D-mallit luotiin ANSYS Discovery -ohjelmistolla.

10.1 Tulokset

Työssä käytettiin tutkimuskysymyksinä seuraavia:

1. Onko markkinoilla olemassa valmiita ratkaisuja, joita voitaisiin hyödyntää?
2. Millaiset olosuhteet tiivistyspaikassa on?
3. Millaista tiivistettä tai millaisia tiivisteitä kannattaisi tutkia ja jatkokehittää?

Tutkimuskysymyksien vastaukset järjestyksessä:

1. Markkinoilla on hyvin vähän ratkaisuja ja lähes kaikki löydetyt ratkaisut olivat joko testilaitteita tai oletettavasti yksittäisvalmisteita. Näistä keksinnöistä ei myöskään tiedetty varmasti, että toimivatko ne oikeasti, vaikka niistä on jätetty patentteja. Fraunhoferin ruoankuivain oletettavasti toimi, mutta sen rakenne ei soveltunut paperikoneeseen, vaikka ideaa koitettiin muokata tarpeeseen sopivaksi.
2. Työssä selvisi, miten viiraa simuloidaan ja minkä suuntainen tiivistyksen tarve on kuivaimen sisäpaineen ollessa joko 50 Pa tai 5000 Pa. Samalla selvitettiin myös, miten rajakerrosilma liikkuu viiran pinnalla kuivaimeen ja miten sitä simuloidaan mittaustulosten mukaan. Selvisi, että siirtoviiran nippi luo alipaineen viirojen väliin, joka imee sali-ilmaa suoraan viirojen pinnoille. Toivotulla 50 pascalin paineella ilmavirta menee kuivaimeen sisään ilman tiivistettä. Ja tiivisteen ja viiran välissä pitäisi olla hyvin pieni aukko, että se vaikuttaisi olennaisesti rajakerrosvirtaukseen.
3. Tiivistekehityksessä löydettiin kehityskelpoisia ratkaisuja.

10.2 Jatkotutkimuskohteet

Höyrykuivaimen kehitystyö jatkuu Valmetilla työn jälkeen SteamDry-projektin tiimoilta. Tiivisteestä ei tullut valmista tuotetta työn aikana, joten ensimmäinen jatkotutkimuskysymys onkin:

1. Miten tiiviste tulisi mitoittaa niin, että se toimii?

Mitoitukseen liittyvä jatkokysymys nousee myös simulaattorin tuloksista ja painetarkasteluista:

2. Nostaako tiivisteen alle syntyvä alipaine viiraa ylöspäin vai riittääkö tiivistyspuhallus pitämään sen tarpeeksi alhaalla?
    a. Syntyykö tästä ylimääräistä lepatusta?

Kuivaimen kehitystyö oli työn aikana niin alkuvaiheessa, että tuotteen toiminnasta ei ollut vielä kattavaa ymmärrystä, joten seuraava jatkokysymys on:

3. Millaisia tiivisteitä kannattaisi kehittää, jos reunaehdot muuttuvat?
    a. Voitaisiinko kuivaimen rakennetta muuttamalla saada kerrostuminen toimimaan?
    b. Voidaanko viiran lepattamista vähentää tai poistaa kokonaan, jotta tiiviste voitaisiin tuoda lähemmäksi?
        i. Miten telan päälle sijoitettavaa tiivistettä voisi ja kannattaisi kehittää?
    c. Mitä jos kuivaimen sisäpainetta halutaankin nostaa tai laskea?

Simuloinnit suoritettiin mahdollisimman yksinkertaisina työn nopeuttamiseksi, sillä simulointiin meni aikaa hyvin paljon. Työn aikana ei ehditty syventymään kunnolla mitoitukseen, höyryn ja ilman sekoittumisen simulointiin, eikä myöskään tehdashallin vaikutukseen tiivistämisessä. Näistä aiheista saadaan myös uusia kysymyksiä:

4. Miten simulointitulokset muuttuvat kun:
    a. Tiivisteen mitoitus optimoidaan?
    b. Simuloinnissa tutkitaan höyryn ja ilman sekoittumista tiivisteessä?
    c. Tehdashalli sisällytetään tiivisteen simulointiin?
    d. Viirassa otetaan huomioon ilman läpäisy ja sen sisällä kulkeva ilma?

Tiivistettä kehittäessä keskityttiin vaakasuoralla tasolla sisään kulkevan viiran pinnassa kulkevan rajakerrosilman ja kuivaushöyryn erottamiseen. Tämä koettiin olevan vaikein

tilanne, johon tarvittiin kipeimmin ratkaisua. OptiDry-kuivaimen geometriassa on kuitenkin kuusi erilaista tiivistystilannetta, joista löytyy lisää kysymyksiä:

5. Millainen tiiviste tarvitaan kun:
    a. Vaakasuora viira tulee kuivaimesta ulos?
    b. Viira menee kuivaimen sisään ylhäältä?
    c. Viira tulee kuivaimesta ulos kuivaimen alta?
    d. Viira menee kuivaimen sisään alhaalta?
    e. Viira tulee kuivaimesta ulos kuivaimen päältä?

Kun OptiDry yhdistetään paperikonelinjaan, viimeinen tiivistyspaikka on ehkä mahdollista laittaa huuvan sisään. Tällöin tiivisteelle ei välttämättä olekaan tarvetta. Kysymys kuuluukin:

6. Jos Optidry:n viimeinen tiivistyspaikka on huuvan sisässä:
    a. Tarvitaanko tiivistystä lainkaan?
    b. Onko kuivaimesta vuotava höyry huuvan sisällä hyvä vai huono asia?
        i. Vaikuttaako se positiivisesti huuvan energiatehokkuuteen ja kuivaustehoon huuvan sisässä vai hukkaako se liikaa tulistettua höyryä?

Höyryllä puhaltaminen vaikutti olevan hyvä tapa erottaa kuivaushöyry ja ilma toisistaan. Puhaltamisessa ja etenkin kulmassa puhaltamisessa nousi esiin kysymys, että puhaltaako tiivistehöyry kuituja irti paperista. Kysymys kuuluu, että:

7. Aiheuttaako tiivisteen höyrypuhallus liiallista kuitujen irtoamista?
    a. Heikentääkö se höyrykuivaimen tehoa, jos kiertoon päätyy kuituja?
    b. Voiko puhaltamisen tehdä eri kohdassa tai useammalla puhalluksella, jotta kuidut voidaan ohjata eri paikkaan?

Perinteinen huuva on päistään auki, jotta viirat ja paperi saadaan huuvan sisään ja huuvasta ulos. Tästä herää kysymys:

8. Voidaanko höyrykuivaimen tiivisteestä saada ratkaisuja huuvan energiatehokkuuden parantamiseen?
    a. Onko tällaiselle edes tarvetta?

10.3 Loppusanat

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella Valmetilla pystytään jatkokehittämään ja simuloimaan tiivisteitä entistä paremmin. Haarukoinnin perusteella on löydetty toimivat konseptit ja tunnistettu tiivistyksen tehokkuuteen liittyviä tekijöitä, joiden perusteella voidaan ohjata kehitystä uuteen suuntaan. Työn aikana kehitetty tiivistekonsepti saatiin ajoissa valmiiksi testikoneen jatkokehitystä varten. Konsepti keräsi kehuja yhteistyökumppaneilta ja sitä pidettiin lupaavana löytönä, joka etenee jatkokehitykseen ja testaukseen.

11. LÄHTEET

[1] J. Näveri, ”Tulistetun höyryn hyödyntäminen paperikoneen kuivatusosalla,” Jyväskylä, 2023.

[2] SteamDry consortium, 2024. [Online]. Available: https://steamdry.eu/. [Haettu 2024].

[3] Euroopan komissio, ”Euroopan vihreän kehityksen ohjelma,” 14 7 2021. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/ip_21_3541. [Haettu 8 1 2025].

[4] Eurooppa-neuvosto, ”55-valmiuspaketti,” 12 4 2024. [Online]. Available: https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/fit-for-55/. [Haettu 8 1 2025].

[5] Valmet, ”Valmetin ilmasto-ohjelma,” [Online]. Available: https://www.valmet.com/fi/kestava-kehitys/ilmasto-ohjelma/. [Haettu 14 2 2025].

[6] Valmet, ”Liiketoimintamme edistää kestävää kehitystä,” [Online]. Available: https://www.valmet.com/fi/kestava-kehitys/kestava-kehitys-valmetissa/. [Haettu 14 2 2025].

[7] KnowPap v.26.0, 2024. [Online]. Available: https://www.knowpap.com/.

[8] M. Karlsson, Papermaking Part2, Drying, Helsinki: Paperi ja Puu Oy, 2010.

[9] Valmet, ”OptiPress Linear,” [Online]. Available: https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/pressing/optipress-linear/. [Haettu 17 2 2025].

[10] Valmet, ”OptiPress Center,” [Online]. Available: https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/pressing/optipress-center/. [Haettu 17 2 2025].

[11] Valmet, ”OptiRun dryer,” [Online]. Available: https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/cylinder-drying/optirun-cylinder-drying/. [Haettu 17 2 2025].

[12] Valmet, ”Sisäiset keskustelut,” 2024-2025.

[13] H. Kiiskinen ja K. Edelmann, ”Superheated Steam Drying of Paper Web,” VTT Energy, Jyväskylä, 2002.

[14] Atlas Copco, ”Höyryn perusteet: Tulistettu höyry,” [Online]. Available: https://www.atlascopco.com/fi-fi/rental/resources/industrial-steam-guide-temperature-control/basics/superheated-steam. [Haettu 18 2 2025].

[15] M. H. Bade, S. V. Jangam ja A. S. Mujumdar, Superheated Steam Drying, Technology for Improved Sustainability and Quality, Taylor & Francis Group, 2024.

[16] E. J. Shaughnessy, I. M. Katz ja J. P. Schaffer, Introduction to Fluid Mechanics, Oxford University Press, 2005.

[17] P. M. Gerhart, A. L. Gerhart, J. I. Hochstein, B. R. Munson, D. F. Young ja T. H. Okiishi, Munson, Young and Okiishi's fundamentals of fluid mechanics. 8th ed., Hoboken: Wiley, 2016.

[18] F. White, Viscous Fluid Flow, 2005.

[19] *YEB421 Lämmönsiirto-kurssi,* Tampereen Yliopisto, 2024.

[20] M. Juniper, ”4.2 Boundary layers,” University of Cambridge, department of Engineering, 27 5 2015. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=fIsfNh_lCZA. [Haettu 21 3 2025].

[21] M. Gudaitis, E. Ireståhl, G. Sakkos ja L. Urbonas, ”The Coanda Effect,” Linköping University, 2017.

[22] World Hovercraft Organization, ”DiscoverHover,” 2004. [Online]. Available: https://www.discoverhover.org/infoinstructors/guide8.htm. [Haettu 5 12 2024].

[23] N. D. Katopodes, Free-Surface Flow, Butterworth-Heinemann, 2019.

[24] VESI.fi, ”Makean veden maksimitiheys saavutetaan 4 °C lämpötilassa,” 16 6 2023. [Online]. Available: https://www.vesi.fi/vesistokunnostuksen-kuukauden-luku/makean-veden-maksimitiheys-saavutetaan-4-c-lampotilassa/. [Haettu 2025 1 27].

[25] Aalto Junior, ”Sokerisateenkaaret,” [Online]. Available: https://www.aalto.fi/sites/default/files/2023-04/junior_fi_ala_Sokerisateenkaaret_oppilas.pdf. [Haettu 27 1 2025].

[26] Kemistin nurkka, ”Sokeriateenkaaret,” 8 2 2017. [Online]. Available: https://kemistinnurkka.wordpress.com/2017/02/08/sokerisateenkaaret/. [Haettu 27 1 2025].

[27] R. Flitney, *Seals and Sealing Handbook. 6th ed.,* Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2014.

[28] F. Wasilczuk, P. Flaszynski, P. Kaczynski, R. Szwaba, P. Doerffer ja K. Marugi, ”Air curtain application for leakage reduction in gas turbine shroud sealing,” *Aerospace Science and Technology,* osa/vuosik. 112, 2021.

[29] G. J. Rushton.Patentti US7238001(B2), 2004.

[30] N. A. Turnquist, K. L. Bruce, C. Cerretelli ja J. E. Tourigny.Patentti US Patent 0297341 A1, 2009.

[31] T. Kawamura ja A. Nomoto, ”SEALING STRUCTURE OF DRIER”. Japani Patentti JPH09105580 (A), 22 04 1997.

[32] T. Kawamura ja A. Nomoto, ”SEALING STRUCTURE OF DRIER”. Japani Patentti JP3677662 (B2), 03 08 2005.

[33] Japan Business Database, ”INOUE KINZOKU KOGYO CO. LTD.,” [Online]. Available: https://jpn.bizdirlib.com/node/116103. [Haettu 18 2 2025].

[34] I. Tadayoshi, T. Susumu ja Y. Hirofumi, ”SEALING STRUCTURE OF SHEET PASSAGE IN DRYER”. Japani Patentti JPH087025 (B2), 29 1 1996.

[35] A. Dalibard, *Superheated steam drying at atmospheric pressure,* Stuttgart: Fraunhofer IGB.

[36] Valmet, *Vanhat tutkimukset.*

[37] H. Schlichting ja K. Gersten, Boundary Layer Theory, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2017.

[38] M. Juniper, ”4.4 & 4.5 Benoulli does not work inside a boundary layer,” University of Cambridge, department of Engineering, 27 5 2015. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=Vab3-QA79qE. [Haettu 14 2 2025].

[39] W. Pattanapol, S. J. Wakes, M. J. Hilton ja K. J. M. Dickinson, ”Modeling of Surface Roughness for Flow Over a Complex Vegetated Surface,” *PROCEEDINGS OF WORLD ACADEMY OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY,* osa/vuosik. 26, pp. 273-281, 2007.

[40] J. Piipponen, *Vakuumijärjestelmän optimointi,* 2018.

[41] Valmet, *Valmetin sisäinen tietokanta.*

[42] *Palaveri Pauli Losoin kanssa 30.12.2024.*

[43] *Palaveri Elomaticin kanssa 27.1.2025.*

[44] Tamfelt, *Ilmankuljetuskokeet 2003 yhteenveto,* 2003.

LIITTEET