

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikan koulutusohjelma

2022

Ida Dahlström

VIRTAUSLASKENNALLINEN ILMAKUIVAINTEN SUUTINOPTIMOINTI

– Valmet Technologies Oy

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun Ammattikorkeakoulu

Konetekniikan koulutusohjelma

2022 | 60 sivua

Ida Dahlström

VIRTAUSLASKENNALLINEN ILMAKUIVAINTEN SUUTINOPTIMOINTI

- Valmet Technologies Oy

Tämä opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Valmet Technologies Oy:lle. Opinnäytetyön tavoitteena oli osoittaa laskennallisten virtaussimulaatioiden (myöhemmin CFD-simulaatio) luotettavuus erilaisten puhallussuuttimien lämmönsiirtokertoimien ja leijutuspainoiden laskennassa. Kuivatustehokkuuden ja ajettavuuden parantamiseksi lämmönsiirtokertoimien ja leijutuspainoiden tutkiminen ja optimoiminen on tärkeää. Parannus suuttimien lämmönsiirrossa nostaa kokonaistehokkuutta ja laskee merkittävästi energiankulutusta.

Opinnäytetyössä suoritettiin ilmalämmönsiirron mittauslaitteistolla (myöhemmin Alfasimulaattori) testejä Puhalluskuivaussuutin 4.0:lle. Tämän jälkeen samalle suuttimelle suoritettiin CFD-simulaatioita vastaavissa olosuhteissa ja tuloksia verrattiin Alfasimulaattorilla tehtyjen testien tuloksiin.

CFD-simulaatioista saatiin vertailukelpoisia tuloksia Alfasimulaattorikokeiden tulosten kanssa. Työssä havaittiin, että Alfasimulaattorissa sekä CFD-simulaatioissa on molemmissa omat virhelähteensä, mutta niistä huolimatta tulokset olivat yhteneväisiä. CFD-simulaatioissa luotua työnkulkua sekä siitä saatuja tuloksia voidaan pitää luotettavana Valmetin erilaisten suutinten optimoinnissa ja käyttää jatkossa osana suutinkehitystä.

Asiasanat:

Virtauslaskenta, lämmönsiirto, päällepuhalluskuivatus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2022 | 60 pages

Ida Dahlström

NOZZLE OPTIMIZATION OF AN AIR DRYER USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

- Valmet Technologies Oy

This thesis was commissioned by Valmet Technologies Oy. The aim of this thesis was to demonstrate the reliability of Computational Fluid Dynamics (later CFD) in the calculation of heat transfer coefficients and pressures of various blowing nozzles. In order to improve the drying efficiency and runnability, it is important to study and optimize heat transfer coefficients and pressures. Improvements in the heat transfer of nozzles increases the overall efficiency and significantly decreases energy consumption.

In this thesis, tests were performed on the air heat transfer measuring equipment (later Alphasimulator) for the Blow Drying Nozzle 4.0. The same nozzle was then subjected to CFD-simulations under similar conditions and the results were compared with the results of the tests performed with the Alphasimulator.

CFD-simulations produced comparable results with the results of the Alphasimulator experiments. It was found that both the Alphasimulator and CFD-simulations have their own sources of error, but the results were still consistent. The workflow created in the CFD-simulations and the results obtained from it can be considered reliable in optimizing Valmet's various nozzles and used as part of the nozzle development in the future.

Keywords:

Fluid dynamics, heat transfer, impingement drying

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	8
1 JOHDANTO	9
2 VALMET TECHNOLOGIES OY	11
3 PÄÄLLEPUHALLUSKUIVATUS	13
3.1 Päällysteen kuivatustavat	13
3.1.1 Infrapunakuivatus	14
3.1.2 Sylinterikuivatus	16
3.1.3 Päällepuhalluskuivatus	17
3.2 Päällepuhalluskuivaimet	19
3.3 Energiatehokkuus	25
4 SUUTTIMIT	28
5 LÄMMÖN- JA MASSANSIIRTO	31
6 CFD-LASKENTA	35
6.1 Air Dryer Simulation Workflow Development: Sprint 1	35
6.2 CFD-simulaation yleistäminen erilaisille suuttimille	36
6.3 Alfasimulaattoritestaus Puhalluskuivaussuutin 4.0	40
6.4 CFD-simulaatiot Puhalluskuivaussuutin 4.0 - staattinen tilanne	43
6.5 Alfasimulaattoritestien ja sitä vastaavien CFD-simulaatioiden vertailu	49
6.6 CFD-simulaatiot lämpötilanmuutoksilla - staattinen tilanne	53
6.7 CFD-simulaatio Puhalluskuivaussuutin 4.0 - liikkuva tilanne	56
7 YHTEENVETO	58
LÄHTEET	60

Kaavat

Kaava 1. Rajaetäisyys $(H/D)_{lim}$.	34
Kaava 2. Lämmönsiirtokerroin α käsin laskettuna.	35
Kaava 3. Lämmönsiirtokerroin α CFD-simulaatiossa laskettuna.	36
Kaava 4. Lämmönsiirtokerroin alumiinipalkeittain.	36
Kaava 5. Periodisuuden laskeminen.	44
Kaava 6. Massavirta lämpötilan funktiona.	54

Kuvat

Kuva 1. Valmetin historia aikajanana (Valmet 2021a).	11
Kuva 2. Sähköinfrapunakuivain (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).	14
Kuva 3. Kaasuinfrapunakuivain (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).	15
Kuva 4. Sylinterikuivain (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).	17
Kuva 5. Päällepuhalluskuivaimen toimintaperiaate (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).	19
Kuva 6. OptiDry Twin ja OptiDry Vertical (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).	20
Kuva 7. OptiDry Coat -kuivainsovelluksia (Valmet 2021d).	21
Kuva 8. OptiDry Turn -sovelluksia (Valmet 2021e).	22
Kuva 9. OptiDry Coat High Intensity ilmajärjestelmä (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).	23
Kuva 10. OptiDry Coat High Intensity ja infrapunakuivain tehokkuus (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).	26
Kuva 11. Kaksipuoleisen ilmakeivaimen suuttimien toimintaperiaate (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).	28
Kuva 12. Puhalluskuivaussuutin 3.0:n 3D-malli.	29
Kuva 13. Suuttimen virtaukset (Incropera & DeWitt 1996, 387).	32
Kuva 14. Suutinreikien pinta-alan määrittäminen (Incropera & DeWitt 1996, 388).	33
Kuva 15. Vastapuhallussuutin 2.1.	37
Kuva 16. Alfasimulaattori, jossa mitattava suutin keskellä.	41
Kuva 17. Alfasimulaattori käytössä.	42

Kuva 18. ANSYS SpaceClaimissa luotu fluiditilavuus.	44
Kuva 19. ANSYS Fluentilla volyymiverkotettu kappale.	45
Kuva 20. Lämmönsiirtokertoimien jakautuminen suutinlevyä vastaavalle pinnalle.	48
Kuva 21. Staattisten paineiden jakauma suutinlevyä vastaavalla pinnalla.	49

Kuviot

Kuvio 1. Alfasimulaattoritestien lämmönsiirtokertoimet alumiinipalkkien funktiona.	43
Kuvio 2. Lämmönsiirtokertoimet isoleikkauspintojen funktiona.	47
Kuvio 3. Paineet isoleikkauspintojen funktiona.	48
Kuvio 4. Lämmönsiirtokertoimet puhallusnopeuksien funktiona.	50
Kuvio 5. Lämmönsiirtokertoimet suutinpaineiden funktiona.	51
Kuvio 6. Lämmönsiirtokertoimet puhallusnopeuksien funktiona.	51
Kuvio 7. Lämmönsiirtokertoimet suutinpaineiden funktiona.	52
Kuvio 8. Lämmönsiirtokertoimet puhallusnopeuksien funktiona.	52
Kuvio 9. Lämmönsiirtokertoimet suutinpaineiden funktiona.	53
Kuvio 10. Lämmönsiirtokertoimet isoleikkauspintojen funktiona.	54
Kuvio 11. Paineet isoleikkauspintojen funktiona.	55
Kuvio 12. Lämmönsiirtokertoimet isoleikkauspintojen funktiona, liikkuva tilanne 10 m/s.	57
Kuvio 13. Suutinpaineet isoleikkauspintojen funktiona.	57

Taulukot

Taulukko 1. Suutinmallien paineiden vertailu, staattinen tilanne.	38
Taulukko 2. Suutinmallien lämmönsiirtokertoimien vertailu, staattinen tilanne.	38
Taulukko 3. Suutinmallien paineiden vertailu, liikkuva tilanne.	39
Taulukko 4. Suutinmallien lämmönsiirtokertoimien vertailu, liikkuva tilanne.	40
Taulukko 5. Puhallusnopeudet paineen sekä massavirran avulla.	46

Taulukko 6. Lämpötilanmuutosten vaikutus suutinpaineeseen sekä lämmönsiirtokertoimiin.

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

.stp	Tiedostomuoto kolmiulotteisen tietokoneavusteisen suunnittelun tietojen vaihtoon
A	Pinta-ala
CFD	Laskennallinen virtausdynamiikka (Computational Fluid Dynamics)
Cp	Lämpökapasiteetti
EMEA	Eurooppa, Lähi-Itä ja Afrikka
q	Lämpövirta pinnan läpi laskettuna CFD:llä
T_{∞}	Tuloilman vertailulämpötila 200 °C
T_a	Alumiinipalkin lämpötila
Δt	Ajan muutos
ΔT_l	Logaritminen lämpötilaero alumiinilevyn ja referenssi-ilman lämpötilan välillä

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty toimeksiantona Valmet Technologies Oy:lle. Työn tarkoituksena on osoittaa CFD-simulaatioiden luotettavuus puhalluskuivaus-, ilmankääntö- ja vastapuhallussuuttimien lämmönsiirtokertoimien ja leijutusaineiden laskennassa. Opinnäytetyön aihe on sidoksissa Valmetin ja EDRMedeson aiemmin suorittamaan Air Dryer Simulation Workflow Development: Sprint 1 -tutkimukseen. EDR & Medeso Oy on Valmetin yhteistyöyritys, ANSYS-ohjelmiston maahantuoja ja erikoistunut tekniseen tukeen sekä koulutukseen. Tutkimuksessa testattiin CFD-simulaatiota Puhalluskuivaussuutin 3.0:lle yhdellä mittauspisteellä.

Kuivatustehokkuuden ja ajettavuuden parantamiseksi lämmönsiirtokertoimien ja leijutusaineiden tutkiminen ja optimoiminen on tärkeää. Nykyaikaisella sisäpakkauskartonkikoneen päällystysosalla haihdutetaan noin 20 000 kg vettä tunnissa, rataan siirretään noin 14 MW lämpötehoa päällepuhallussuuttimilla ja samalla vesi siirretään lämmöntalteenoton kautta ulos. Parannus suuttimien lämmönsiirrossa nostaa kokonaistehokkuutta ja laskee merkittävästi energiankulutusta.

Työn tavoitteena on tutkia, vastaavatko CFD-simulaatioiden tulokset ilmalämmönsiirron mittauslaitteistolla eli Alfasimulaattorilla suoritettujen suutinkokeiden tuloksia sekä voidaanko simulaatioita käyttää laajasti erilaisten suuttimien optimoinnissa. Jos CFD-simulaatiot todetaan luotettaviksi, voidaan suuttimia ja kuivatusprosessia optimoida laskennallisesti ilman tarvetta kokeelliselle tutkimukselle.

Työssä kehitetään CFD-laskennallinen työnkulku, jota voidaan suoraan soveltaa kaikkiin eri Valmetin suutinmalleihin. Työn aikana Puhalluskuivaussuutin 4.0 testataan Alfasimulaattorilla ja tuloksia verrataan CFD-simulointiin.

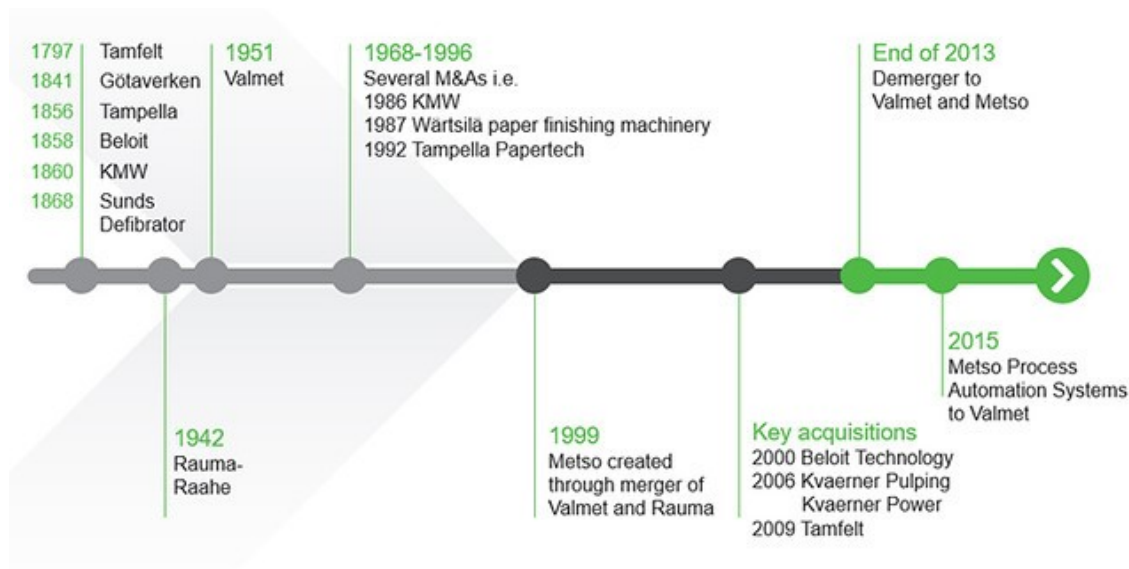
Opinnäytetyössä kappaleet mallinnetaan Catia V6 -ohjelmistolla, ja CFD-simulaatioihin käytetään ANSYS SpaceClaim- sekä ANSYS Fluent -ohjelmistoja. Opinnäytetyössä käytetään ensisijaisesti lähteenä Valmetin työntekijöille

suunnattujen tietokantojen materiaaleja sekä aiheen kirjallisuutta. Salassapitovelvollisuuden vuoksi Valmetin salaiseksi luokiteltuja menetelmiä ja tietoja ei julkaista.

2 VALMET TECHNOLOGIES OY

Valmet on yli 200 vuoden teollisuushistoriallaan maailman johtava teknologian, automaation ja palveluiden toimittaja sekä kehittäjä sellu-, paperi- ja energiateollisuudelle. Valmetin neljä liiketoimintalinjaa ovat palvelut, sellu ja energia, paperit sekä automaatio. Näiden lisäksi toiminta on jaettu viiteen maantieteelliseen alueeseen, jotka ovat Pohjois-Amerikka, Etelä-Amerikka, EMEA, Kiina sekä Aasian ja Tyynenmeren alue. (Valmet 2021a.)

Valmetin juuret ylettyvät jopa 1750-luvulle saakka, jolloin Suomenlinnaan perustettiin pieni allastelakka. Tämä telakka päätyi melkein 200 vuotta myöhemmin Suomen valtion omistukseen ja osaksi Valmetia. Monet yrityksistä, jotka ovat osa nykypäivän Valmetia, perustettiin 1800-luvulla. 1950-luvulla Valmet aloitti paperikoneiden valmistuksen ja nousi jo 1960-luvulla kansainvälisesti merkittäväksi paperikonevalmistajaksi. Vuonna 1999 Valmet ja Rauma yhdistyivät Metso Oyj:ksi, mutta joulukuussa 2013 Valmet syntyi uudelleen sellu-, paperi- ja voimantuotantoliiketoiminnan irtautuessa Metsosta. Kuvassa 1 on esitettyä Valmetin historian tärkeimmät tapahtumat. (Valmet 2021a.)



Kuva 1. Valmetin historia aikajanana (Valmet 2021a).

Valmet on markkinajohtaja vakiintuneella markkina-aseamalla kaikissa liiketoiminnoissaan. Sellu- ja energia -liiketoimintalinja tarjoaa teknologiaa sekä ratkaisuja sellun ja energian tuotantoon, biomassan jalostukseen ja päästöjen hallintaan. Paperit -liiketoimintalinja taas toimittaa kokonaisia tuotelinjoja, koneuusintoja sekä prosessikomponentteja kartongin, pehmopaperin ja paperin valmistukseen. (Valmet 2021a.)

Valmetin missiona on muuntaa uusiutuvista raaka-aineista kestäviä ja vastuullisia tuloksia ja kestävä kehitys onkin liiketoimintastrategian keskiössä. Valmetin teknologioiden ja ratkaisuiden avulla asiakkaat voivat valmistaa kestäviä tuotteita uusiutuvista raaka-aineista. Tavoitteena on myös vähentää oman toiminnan hiilidioksidipäästöjä 80 prosentilla vuoteen 2030 mennessä. Onnistuakseen tavoitteessaan Valmet korvaa fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla toimipisteissä, hankkii hiilidioksidivapaata sähköä ja kaukolämpöä sekä parantaa energiatehokkuutta. (Valmet 2021b.)

Valmetin visiona on tulla maailman parhaaksi asiakkaidensa palvelussa ja yrityksen strategian ydintä onkin vahva sitoutuminen asiakkaiden menestyksen edistämiseen. Valmetilla työskentelee noin 14 000 henkilöä 30 eri maassa ja yhtiön liikevaihto vuonna 2020 oli noin 3,7 miljardia euroa. (Valmet 2021a.)

3 PÄÄLLEPUHALLUSKUIVATUS

Paperin tai kartongin valmistusprosessissa raaka-ainekomponentit käsitellään ja sekoitetaan massaseokseksi. Seos on kosteaa, joten se siirretään puristinosalle, jonka tehtävänä on puristamalla poistaa rainasta mahdollisimman paljon vettä ja tiivistää sitä. Puristimella pyritään saavuttamaan riittävä märkäluku, jotta massarina pystytään siirtämään kuivatusosalle katkeamatta. (KnowPap 22.0 2021.)

Paperin tai kartongin valmistusprosessissa lopputuote jälkikäsitellään. Jälkikäsitelyprosessit vaihtelevat tuotteittain, mutta pituusleikkaus sekä tarvittavat rullaukset tehdään yleisesti aina valmistettavasta paperi- tai kartonkilajista riippumatta. Tuote voidaan lisäksi esimerkiksi pintaliimata tai päällystää. (KnowPap 22.0 2021.)

Päällystyksen tarkoituksena on parantaa tuotteen ulkonäköä sekä painettavuutta. Tuotteen sileys paranee, painoväriin absorptio pienenee, pölyävyys vähenee ja kiilto sekä opasiteetti paranevat. Näiden lisäksi päällystäminen vaikuttaa tuotteen rakenneominaisuuksiin sekä ajettavuuteen. (KnowPap 22.0 2021.)

Paperin tai kartongin pintaan levitetään päällystyspasta joko vain toiselle tai molemmille puolille. Pasta sisältää pigmenttiä ja sideainetta ja se tuodaan päällystysasemalle seoksena, jonka kuiva-ainepitoisuus on 40–70 %. Veden poistaminen kuivatusasemalla vaatii paljon energiaa, joten kuiva-ainepitoisuus pyritään saamaan mahdollisimman korkeaksi jo ennen sitä. (KnowPap 22.0 2021.)

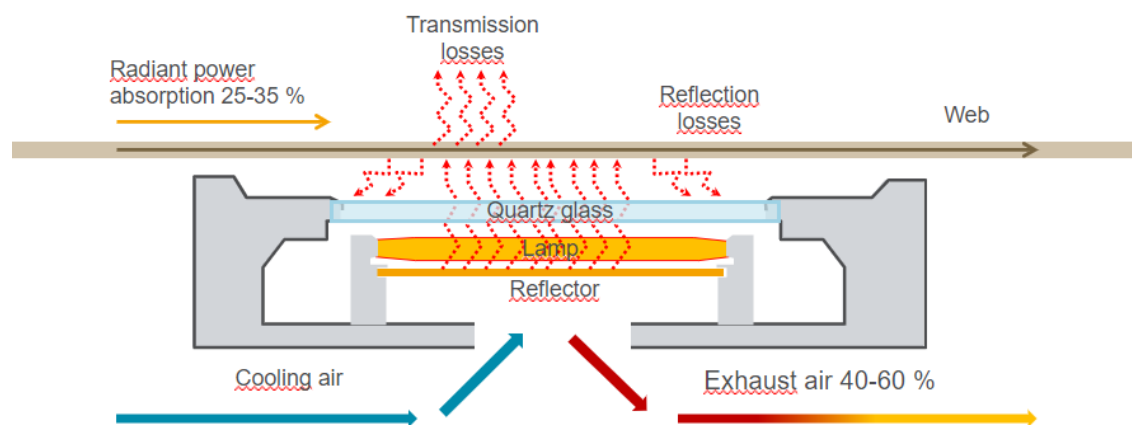
3.1 Päällysteen kuivatustavat

Kuivatus on yksi tärkeimmistä päällystyksen osaprosesseista. Rainan kosteus nousee päällystysasemalla, joten loppu- tai välikosteuden saavuttamiseksi rainasta on poistettava ylimääräinen vesi. Kuivatusosan tehtävänä on poistaa paperista vettä haihduttamalla tehokkaasti, tasaisesti ja taloudellisesti

huonontamatta tuotteen laatua. Päälystetyn kartongin tai paperin kuivatusprosessi on monimutkainen ja vaikuttaa lopputuotteen laatuun, tuotannon taloudellisuuteen sekä koko koneen tehokkuuteen. Paperin ja kartongin valmistuksessa käytetään yleisesti kolmea eri kuivatusmenetelmää, jotka ovat kontakti- eli sylinterikuivatus, säteily- eli infrapunakuivatus sekä päällepuhalluskuivatus. (KnowPap 22.0 2021.)

3.1.1 Infrapunakuivatus

Infrapunakuivatuksessa liekillä tai vastuksella lämmitetään keraamista säteilijää. Kun säteily kohtaa ainekerroksen, osa säteilystä läpäisee sen ja osa heijastuu takaisin. Osa kuitenkin absorboituu itse ainekerrokseen, ja tätä osaa säteilystä infrapunakuivatus käyttääkin hyväkseen. Infrapunakuivaimet jaetaan kaasu- ja sähköinfroihiin sen mukaan, millä säteilevä pinta lämmitetään. (KnowPap 22.0 2021.) Vain noin 50 % lämmöstä muuttuu lämpösäteilyksi ja hukkalämpö ilmastoidaan pois säteilijän läheltä, jottei lämpötila nousisi liian korkeaksi. Hukkalämpö pyritään käyttämään hyödyksi esimerkiksi ilmakeivaimissa. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

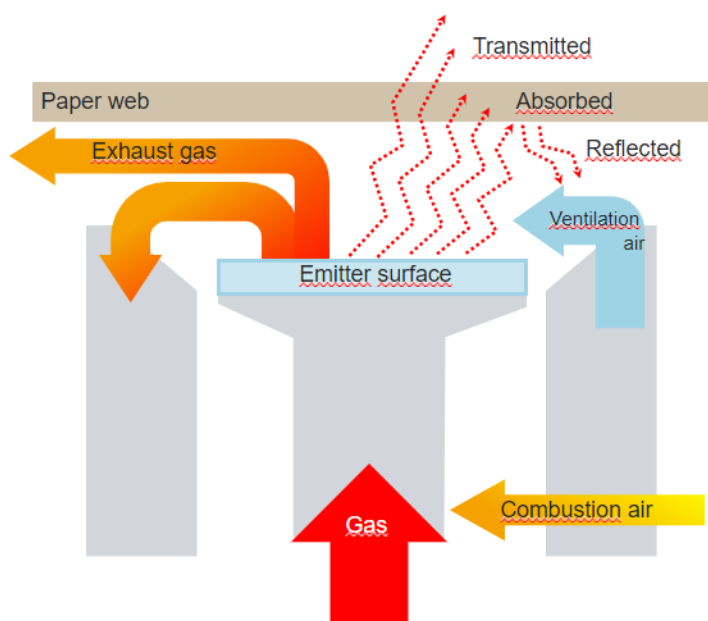


Kuva 2. Sähköinfrapunakuivain (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).

Sähköinfrakuivain koostuu lampuista, heijastimesta sekä jäähdytysjärjestelmästä. Heijastinta käytetään lämmitystehon parantamiseen kääntämällä ainekerroksen läpi tullut säteily takaisin rataan. Heijastin sijaitsee lampun takana ja sen tulee heijastaa säteilyä mahdollisimman hyvin. Sähköinfraille päästään korkeampiin pintalämpötiloihin ja näin ollen myös lyhyempään aallonpituuteen kuin kaasuinfraille. (KnowPap 22.0 2021.) Säteilijöiden poistoilma johdetaan jäähdytysilman esilämmitykseen infraille tai ulos sekä osittain etukuivatusosan korvausilmaksi (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).

Sähköinfron etuina voidaan pitää pientä tilantarvetta, suurta tehotehyyttä, helppoa säädettävyyttä, tasaista lämmitystä sekä hyvää säteilyn tunkeutuvuutta. Huonoina puolina sähköinfraille ovat suuret käyttökustannukset, alhainen hyötysuhde, suuri jäähdytysilman tarve, ylläpöriski sekä herkkä likaantuvuus, joka laskee hyötysuhdetta. (KnowPap 22.0 2021.)

Kuvasta 3 ilmenee kaasuinfran toimintaperiaate. Kaasuinfraille käytetään polttoaineena kaasua ja palamisilma otetaan konesalista tai puhallinhuoneesta, suodatetaan ja puhalletaan säteilijöille. Poistoilma johdetaan lämmöntalteenottoon tai ulos. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)



Kuva 3. Kaasuinfrapunaikuivain (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).

Palava kaasuliekki lämmittää säteilevän pinnan, josta säteily kohdistuu kartonkirataan. Kaasuinfrojen maksimilämpötila on noin tuhat Celsiusastetta alhaisempi kuin sähköinfroilla ja säteily on pitkäaaltoisempaa sekä vähemmän läpituokevaa, joten vastaheijastinta ei käytetä lainkaan. Kaasuinfrojen säätö tapahtuu kytkemällä laitteisto riveittäin toimintaan tai säätämällä infrassa poltettavaa kaasumäärää. (KnowPap 22.0 2021.)

Verrattuna sähköinfraan, kaasuinfrassa on edullisempi energian hinta, pienemmät investointikustannukset jos kaasua on helposti saatavilla sekä säteily imeytyy paremmin matalamman säteilylämpötilan vuoksi. Absorptiohyötysuhde on näin ollen kaasuinfroissa korkeampi kuin sähköinfroissa. Kaasuinfroissa on kuitenkin suurempi paloriski, huono profiloitukyky ja se saavuttaa hitaammin maksimitehonsa sähköinfroihiin verrattuna. (KnowPap 22.0 2021.)

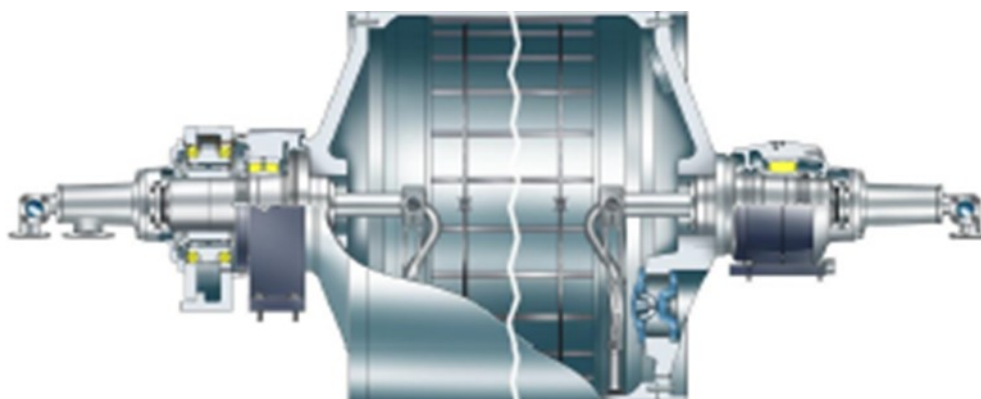
Infrapunakuivain ei suoraan kuivaa kartonkirataa vaan nostaa sen lämpötilaa, jolloin radan sisäinen höyrypaine nousee. Höyrypaine-ero radan ja ympäröivän ilman välillä aiheuttaa radan kuivumisen. Infrapunakuivaimia käytetään yleensä lämmittämään rataa ennen varsinaista paperin tai kartongin kuivatusta, jotta märkä päällyste ei tartu myöhemmin kuivatussylinterien pintaan. Infrapunakuivaimia käytetään myös kosteusprofiilin parantamiseen tehostamalla kuivatusta märkien alueiden kohdilla. Suurimpina etuina infrapunakuivatuksessa ovat suuret tehot, aina 400 kW/m² asti, sekä pieni tilantarve tehoon nähden. (KnowPap 22.0 2021.)

3.1.2 Sylinterikuivatus

Pinnaltaan kuumia sylintereitä käytetään poistamaan vettä paperi- ja kartonkirainasta. Sylinterit sijoitetaan viimeiseksi ilma- ja infrakuivaimien jälkeen, jotta märkä päällyste ei tartu sylinterien pintaan. Sylintereitä lämmitetään syöttämällä höyrykytkimen kautta höyryä tietyssä paineessa olevaan sylinteriin, jolloin höyry luovuttaa lämpönsä sylinterin seinämään ja lauhtuu vedeksi. Lauhde poistetaan sylinteristä erillisillä lauhteenpoistimilla. Lämmitykseen voidaan

käyttää myös höyryn lisäksi öjyä tai sähköä, mutta se on harvinaisempaa. (KnowPap 22.0 2021.)

Kuvassa 4 on tyypillinen kuivatussylinteri, eli raudasta valettu paineastia, jonka ulkopinta on sorvattu ja hiottu. Sylinterien halkaisijat ovat yleensä 1500 mm tai 1830 mm ja seinämävahvuudet 20–35 mm. Sylintereissä käytetty ylipaine vaihtelee -0,5 bar...6,0 bar välillä. (KnowPap 22.0 2021.)



Kuva 4. Sylinterikuivain (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).

Veden haihduttaminen tapahtuu yleensä monisylinterikuivatuksella. Haihduttaminen sylintereillä on halpaa höyryn edullisen hinnan vuoksi ja varsinkin silloin, jos saatavilla on voimalaitoksen vastapainehöyryä. Sylintereillä on tärkeä merkitys ajettavuuden parantamisessa ja nykyaikaisissa kartonkikoneissa sylinterit toimivat enemmänkin vetoryhmänä tuottaen radalle tarvittavan kireyden. Sylintereillä lämmitetään usein taustapuolta, jolloin lämmityksen aiheuttama haihtuminen korjaa päällystyksen aiheuttamaa käyristymää. (KnowPap 22.0 2021.)

3.1.3 Päällepuhalluskuivatus

Päällepuhalluskuivatus on kolmesta kuivatusmenetelmästä uusin. Kuivaavana väliaineena toimii kuuma ilma, jota puhalletaan suurilla nopeuksilla paperin pintaa

vasten ja kierrätetään takaisin kuivaimeen. Ilma lämmitetään kaasupolttimilla, mikä aiheuttaa vähemmän CO₂-päästöjä kuin esimerkiksi hiilen polttaminen höyryn tuottamiseksi sylinterikuivatusta varten. (KnowPap 22.0 2021.)

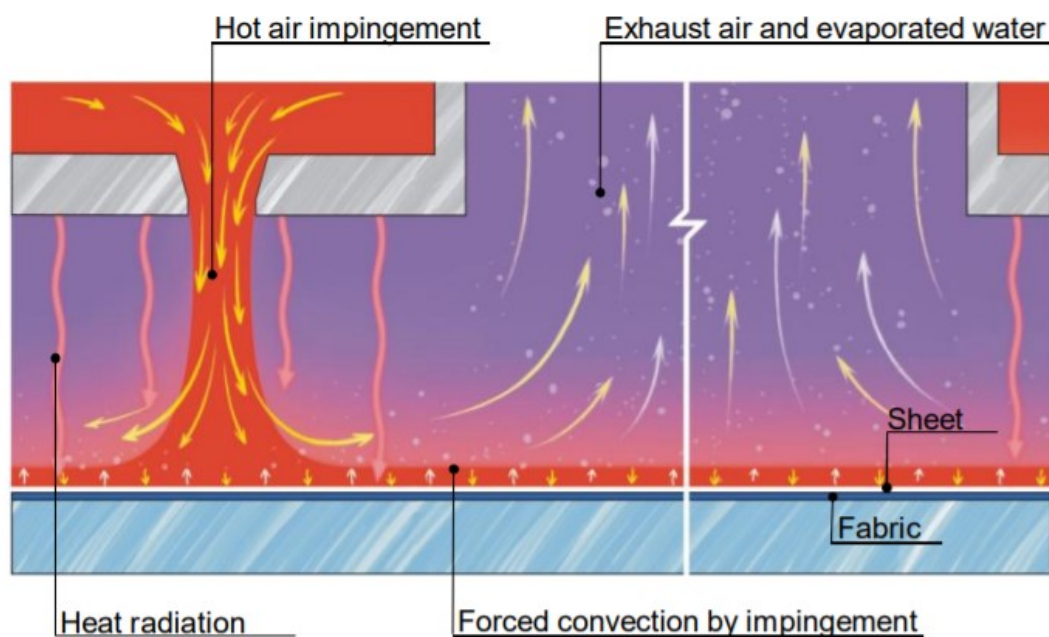
Kuivaus on termodynaaminen prosessi, joka voidaan jakaa kahteen ryhmään. Ensimmäisenä on rajakerrostapahtuma pinnoitteen ulkopuolella ja toisena kosteus- ja lämmönsiirto pinnoitteen ja pohjakartongin sisällä. Jälkimmäistä on vaikea selittää fyysisesti ja matemaattisesti. Siinä tapahtuu yhtäaikaaisesti pintakuitujen turpoamista, kapillaarivoimia ja kosteuden diffuusiovirtausta. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Yleisesti kuivatus on kosteuden siirtoa ilmaan. Lämpö nostaa höyrynpainetta kosteassa päällysteessä ja ajaa kosteuden ilmaan. Kosteaa, liikkumatonta ilmaa radan pinnalla on resistanssi haihtumiselle. Radan pinnassa on aina rataa nähden liikkumatonta ilmakerrosta. Puhalluksen avulla ilmakerros muuttuu lyhyellä etäisyydellä radasta laminaarisesta turbulenttiseksi. Lämmönsiirtokerroin johtuu laminaarisen ilmakerroksen paksuudesta ja laminaarisen kerroksen paksuuden minimoiminen maksimoi lämmönsiirtokerroin. Turbulenttisella alueella ilman lämpötila on vakio. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Päällepuhalluskuivatus on erittäin tehokasta, ja siinä on myös huomattavasti suurempi ominaishaihdutusteho verrattuna sylinterikuivatukseen. Haihdutusteho voi olla jopa viisinkertainen kuivatuspinta-alaa kohden laskettuna ja kuivatusnopeus on myös 3–4-kertainen sylinterikuivatukseen nähden. Päällepuhalluskuivainten energiatehokkuus on huomattavasti korkeampi kuin infrapunakuivaimilla ja lisäksi kunnossapitokustannukset ovat matalammat. Tästä johtuen sylinteri- ja infrapunakuivaimia korvataan nykyisin päällepuhalluskuivaimilla. (KnowPap 22.0 2021.)

3.2 Päällepuhalluskuivaimet

Päällepuhalluskuivainten toiminta perustuu kuuman kiertoilman puhallukseen. Ilma puhalletaan kohti kosteaa paperirataa, jolloin se luovuttaa lämpöenergiaa paperissa olevalle vedelle ja vesi höyrystyy ympäröivään ilmaan. Jäähdyntynyt, kostea ilma imetään kuivaimesta takaisin kiertoilmajärjestelmään. Kuvasta 5 ilmenee päällepuhalluskuivaimen toimintaperiaate. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)



Kuva 5. Päällepuhalluskuivaimen toimintaperiaate (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).

Puhallusilma lämmitetään kiertoilmalaitteilla haluttuun lämpötilaan ja kiertoilmaan sitoutunut vesi poistetaan poistoilmalaitteilla. Korvausilmalaitteilla tuodaan kuivempaa ilmaa tilalle ennen kuin kiertoilma lämmitetään uudestaan haluttuun lämpötilaan ja puhalletaan kohti paperirataa. Kuivatusilman kierrätys kiertoilmalaitteistossa takaa hyvän energiahyötysuhteen. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Kuivatusosalla poistetaan vettä siten, että tuotteen loppukosteus on noin 6–9 %. Ilmakuivainten energiatehokkuus voi kohota jopa 90 %:iin, mutta tavallisesti se on noin 60–80 %. Infrapunakuivaimien energiatehokkuus jää parhaimmillaankin vain 40 %:iin, joten ero näiden kahden kuivaintyyppin välillä on huomattava. Ilmakuivaimet ovat myös ympäristöystävällisiä, ja lisäksi ne tarvitsevat vain vähän huoltoa. (Valmet 2021d.)

Valmetin ilmakuivainperheen muodostavat OptiDry-kuivaimet useilla erilaisilla sovelluksillaan (Valmet 2021d). OptiDry Twin- ja OptiDry Vertical -kuivaimet on suunniteltu korvaamaan perinteisiä sylinterikuivaimia, ja OptiDry Coat -kuivaimet on tarkoitettu päällysteen kuivatukseen. Niillä korvataan nykyisin infrapunakuivaimia. Kuvassa 6 näkyvät Twin- sekä Vertical-kuivaimet.

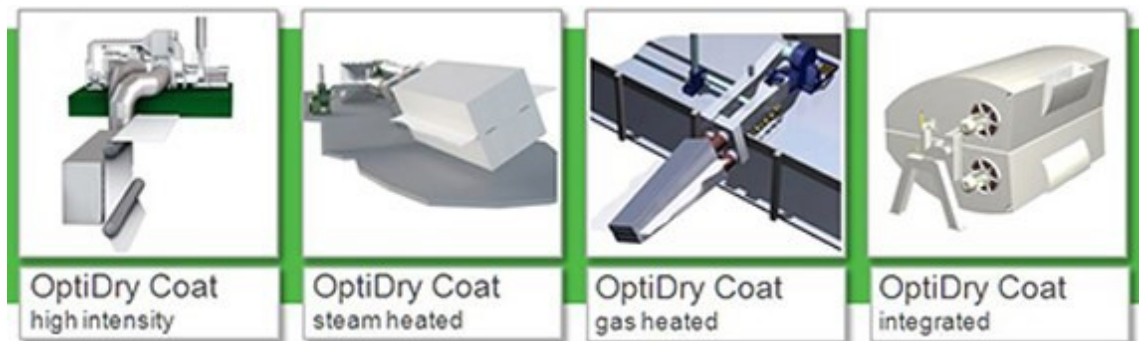


Kuva 6. OptiDry Twin ja OptiDry Vertical (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).

OptiDry Twin -päällepuhalluskuivaimella saadaan korkea kuivaustehokkuus ja konetta voidaan ajaa suurilla nopeuksilla. Tämä kuivain voidaan asentaa puristinosan jälkeen parantamaan edelleen kuivauskapasiteettia ja ajettavuutta nopeilla paperi- ja ulkopakkaus Kartonkikoneilla. Päällepuhallusyksikkö koostuu vaakasuuntaisesta- sekä pystysuuntaisesta osasta ja lämmitykseen käytetään maakaasua. Rainaa lämmitetään ja kuivataan yläpuolelta vaakasuoralla osalla ja tästä raina siirretään pystysuuntaiseen osaan, jossa kuivatus jatkuu rainan alapuolelta. (KnowPap 22.0 2021.)

OptiDry Vertical on kuivain, jolla saadaan erinomainen kuivatustehokkuus sekä ajettavuus, ja se sopii erityisesti tilanteisiin, jossa vanhoja koneita uusitaan. Laite koostuu kahdesta huuvasta, jotka puhaltavat ilmaa suoraan rainan pinnalle. Puhallusilma lämmitetään kaasupolttimilla ja ilmankierto sekä polttimet on integroitu kuivatushuuviin, joten ulkoinen tilantarve on tämän vuoksi pieni. OptiDry Vertical parantaa paperin laatua ja tasaisen kuivatuksen seurauksena myös kosteus- ja kireysprofiilit ovat tasaisia. Pitkä päällepuhalluskuivatusvaihe merkitsee parantunutta kuivatuskapasiteettia, suurempaa nopeutta ja lisätuotantoa ilman tarvetta muutoksille olemassa olevaan rakennukseen. (KnowPap 22.0 2021.)

OptiDry Coat -ilmakuivaimet ovat yhden tai kahden puolen päällysteen kuivaukseen. Lämmitys voidaan tehdä kaasulla, sähköllä tai höyryllä. Nämä kuivaimet on suunniteltu suurta kuivaustehoa varten ja sopivat kaikille päällystetyille paperi- ja kartonkilaaduille. Niitä voidaan käyttää sekä uusissa koneissa että modifioitavissa paperikoneissa. OptiDry Coat -kuivaimista on erilaisia sovelluksia ja niistä muutama näkyy kuvassa 7. (Valmet 2021e.)

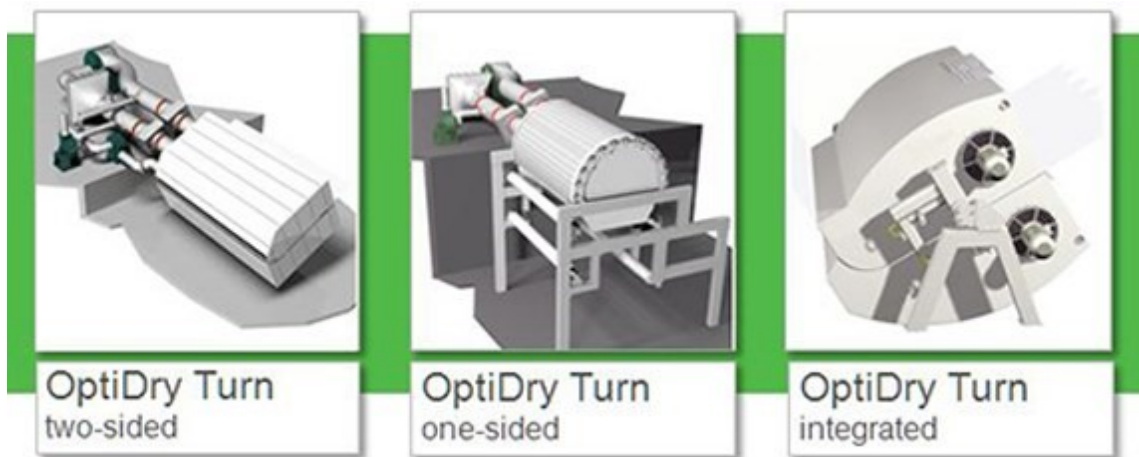


Kuva 7. OptiDry Coat -kuivainsovelluksia (Valmet 2021d).

OptiDry Coat -kuivaimista löytyy myös High Intensity -kuivatusratkaisu. OptiDry Coat High Intensity on kompakti ilmakeivain, joka käyttää lämmönlähteenä kaasua. Kuivain yhdistää suuren kuivatustehon, pienemmän tilantarpeen sekä erinomaisen ajettavuuden. (Valmet 2021d.) Vesi päällysteessä ja pohjakartongin kuituverkossa on joko vapaata vettä tai sidottua vettä. Sidottu vesi on kiintoaineen

sisällä tai pinnoilla kiinni veden pintajännityksellä. Vapaa vesi on kiintoainepartikkelien tai kuitujen välissä. Vapaa vesi voidaan haihduttaa tehokkaasti High Intensity -kuivaimella. Näissä kuivaimissa paperiradan vakaus on taattu suuttimen ja radan väliin muodostuneen ilmatyynyn avulla. Etäisyys rataa ohjataan automaattisesti eri paperilaaduille ja jännitys pysyy koko ajan tasaisena kuivatusalueella. Kuivain sijaitsee päällystysaseman jälkeen ja sillä voidaan korvata infrapunakuivaimia. Paperin laatu pysyy yhtä hyvänä kuin infrapunakuivaimilla, mutta radan lämpötila on matalampi. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

OptiDry Turn -kuivaimet soveltuvat päällystetyn rainan kuivaukseen ja kontaktittomaan kääntöön samanaikaisesti. OptiDry Turn -kuivaimia on mahdollista käyttää kaksipuoleiseen kuivaukseen kaikille paperi- ja kartonkilaaduille sekä yksipuoliseen kuivaukseen päällystetyille kartongille. Lämmitys voidaan toteuttaa kaasulla, sähköllä tai höyryllä. (Valmet 2021f.)

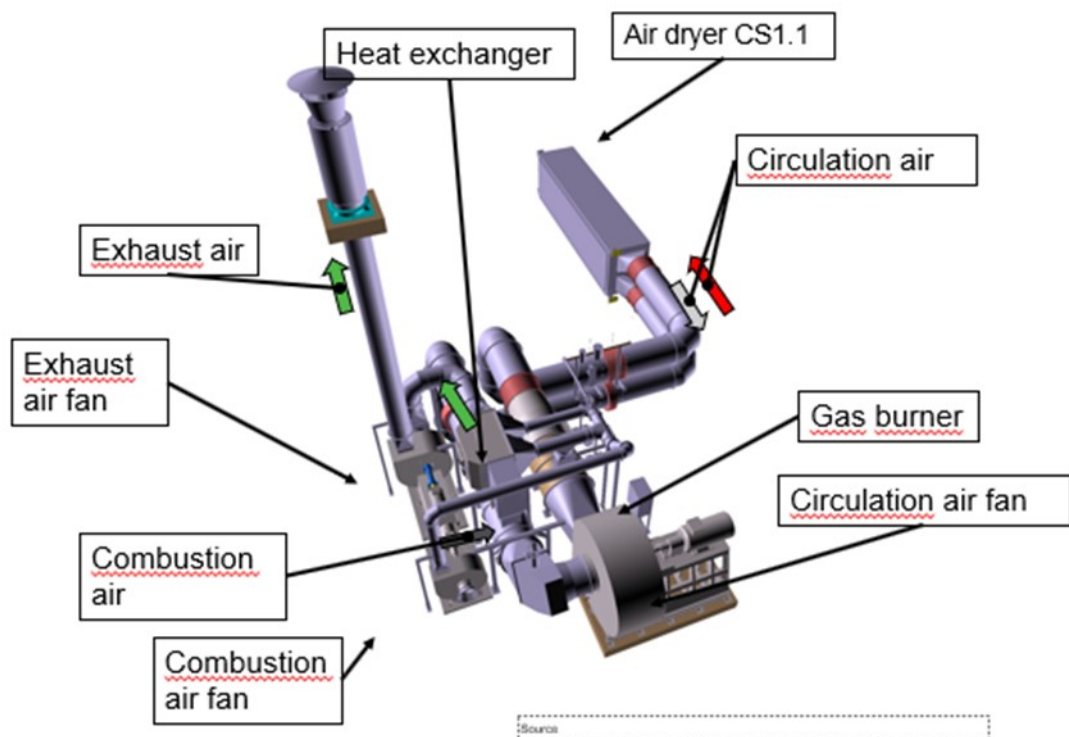


Kuva 8. OptiDry Turn -sovelluksia (Valmet 2021e).

OptiDry Chill mahdollistaa innovatiivisella suutinteknologialla tehokkaan ja kontaktittoman jäähdytykseen. OptiDry Profile on ensimmäinen profiloitintoiminnolla varustettu ilmakeivain, joka mahdollistaa kosteuden profiloinnin sekä kuivatuksen samanaikaisesti. Kuivaimen ansiosta

infrapunakuivaimille ei ole enää tarvetta nykyaikaisissa päällystyskoneissa. (Valmet 2021d.)

OptiDry -kuivaimissa on sisäinen kiertoilmajärjestelmä sekä ulkoinen ilmajärjestelmä. Kuivaimen ilmajärjestelmä koostuu kiertoilmapuhaltimesta, kaasupolttimesta, palamisilmapuhaltimesta, poistoilmapuhaltimesta, lämmönvaihtimesta sekä näiden kanavistoista. Kaasupolttimen sijasta myös höyrylämmönvaihdin ja sähkövastuslämmitin ovat mahdollisia. Ilmajärjestelmän osat näkyvät kuvassa 9. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)



Kuva 9. OptiDry Coat High Intensity ilmajärjestelmä (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).

Kiertoilmalaitteilla lämmitetään puhallusilma haluttuun lämpötilaan eli kiertoilmalle syötetään lämpöenergiaa. Kuuma ilma puhalletaan kuivaimissa suuttimien kautta kostealle paperiradalle, jolloin se luovuttaa lämpöenergiaa paperissa olevalle vedelle ja vesi höyrystyy ympäröivään ilmaan. Kiertoilmakanava on liitetty poisto- ja korvausilmalaitteisiin, jotka poistavat

kostea kiertoilmaa ja tuovat tilalle kuivaa korvausilmaa. Jäähtynyt ja kostunut kiertoilma imetään takaisin kiertoilmakanavaan, minkä jälkeen paperiradasta höyryn muodossa kiertoilmaan sitoutunut vesi poistetaan poistoilmalaitteilla. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Kiertoilman puhallusnopeus lasketaan suutinpaineesta sekä lämpötilasta ja säädetään kierroslukusäätöisillä puhaltimilla. Ilmakuivaimen puhallusilman lämpötilaa säädetään ohjaamalla poltinten kaasunsäätöventtiilejä suutlinlämpötilojen mukaan. Ilmakuivaimesta palaavan kiertoilman lämpötila nostetaan kaasupolttimella haluttuun lämpötilaan. Polttoaineena käytetään maa-, neste- tai biokaasua, joka johdetaan polttimeen erityisen turvaventtiiliryhmän kautta. Venttiiliryhmän turva-, sytytys- ja liekinhallintatoiminnot toimivat automaattisesti polttimen ohjauslogiikan avulla. Kaasu tarvitsee riittävästi happea palaakseen täydellisesti, ja poltin saa tämän hapen palamisilmapuhaltimesta. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Ilmakuivaimesta on poistettava ilmaa, jotta kierrätysilman kosteustaso pysyy oikeana ja kuumaa ilmaa ei pääse vuotamaan kuivaimesta konesaliin. Poistoilma imetään kiertoilmakanavasta ja johdetaan ulos lämmön talteenottojärjestelmän kautta. Poistoilma korvataan kuivemmalla ilmalla tuloilmakanavan kautta ja johdetaan kiertoilmakanavaan kiertoilmapuhaltimen imupuolella. Asianmukaisella lämmön talteenottojärjestelmällä poistoilmaa voidaan käyttää energiankulutuksen vähentämiseen. Kuumaa ja kostea poistoilmaa käytetään palamisilman ja korvausilman lämmitykseen. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Poistoilmamäärää säädetään poistoilmapuhaltimen pyörimisnopeussäädöllä. Ilmakuivaimen ulkopuolella paperiradan läheisyydessä on lämpötila-anturi, jolla kontrolloidaan kuivaimen vuotoilmamäärää eli paineisuutta ympäristöön nähden. Anturin mittaamalle lämpötilalle on laskennallinen asetusarvo ja mikäli mittausarvo on suurempi kuin asetusarvo, ohjataan poistoilmapuhallinta poistamaan enemmän ilmaa ja päinvastoin. Puhallusilman kosteuden nosto laskee kuivatustehokkuutta, sillä päällysteen ja ilman välinen höyrypaine-ero pienenee. Samalla poistoilman- ja korvausilman määrä laskee, jolloin kokonaishyötysuhde nousee, kun korvausilmaa lämmitetään vähemmän

prosessilämpötilaan. Kyse on balanssin säädöstä, jolla saadaan kuivaimen sisäinen paine pysymään oikealla tasolla kaikissa olosuhteissa. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Poistetun ilman tilalle tuodaan kuivempaa ilmaa korvausilmayhteen kautta puhallinhuoneesta ja johdetaan kiertoilmakanavaan kiertoilmapuhaltimen imupuolelle ja kaasupolttimen palamisilmaksi. Kiertoilmalaitteistossa, jossa ilmankuumennusyksikkönä käytetään kaasupoltinta, riittää korvausilmaksi usein pelkkä polttimen vaatima palamisilma. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

3.3 Energiatehokkuus

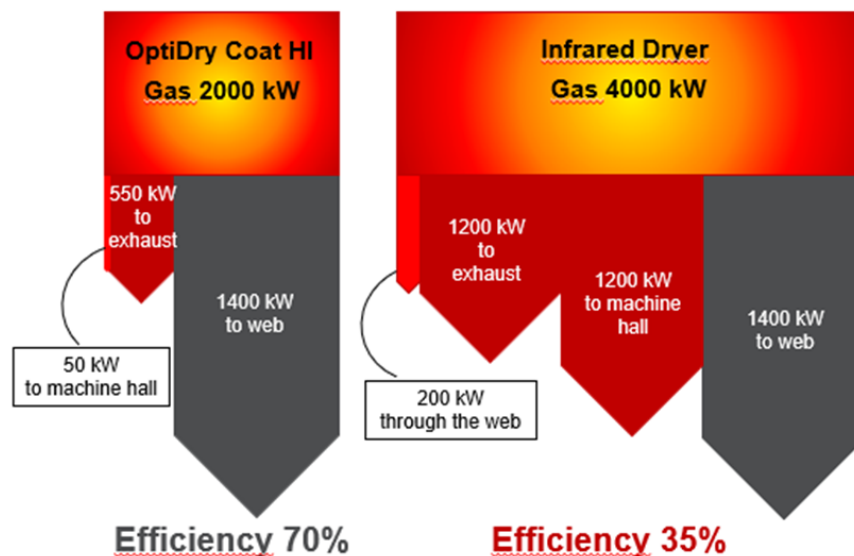
Yhden paperitonnin valmistamiseen paperikoneessa kuluu noin 2500–5500 MJ lämpöenergiaa ja noin 1800–2200 MJ sähköenergiaa. Paperilaji, konetyyppi sekä prosessin energiatehokkuus vaikuttavat kulutukseen merkittävästi. Korkeat vaatimukset energiatehokkaalle paperikoneelle vaikuttavat suoraan energiatalouteen ja uusien tehokkaampien kuivausjärjestelmien kehittämiseen. Lähes kaikki lämpöenergia käytetään paperin kuivatukseen, mikä tekee kuivatusosasta paperikoneen suurimman energiankuluttajan. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Energiansäästöille, hiilidioksidipäästöjen vähentämiselle ja energiatehokkuuden parantamiselle on asetettu maailmanlaajuiset tavoitteet. Energia on myös yksi paperin ja kartongin valmistuksen suurimmista kustannuseristä ja energiansäästöille on vielä paljon hyödyntämätöntä potentiaalia. Prosessin ilmastointiratkaisut tarjoavat erinomaiset mahdollisuudet kustannusten vähentämiseen ja kannattavuuden lisäämiseen sekä uusilla, että vanhoilla koneilla. Ilmajärjestelmät voivat vähentää energiankulutusta tehokkaalla ja mahdollisimman pienellä lämmön- ja sähkön käytöllä sekä vähentämällä primäärienergian käyttöä lämmöntalteenottojärjestelmien avulla. (KnowPap 22.0 2021.) Lämmöntalteenottojärjestelmä pystyy normaalissa sylinterikonfiguraatiossa ottamaan talteen noin 8,3 MW energiaa poistoilmasta, kun taas OptiDry-konseptissa tämä määrä on noin 12,3 MW. Ero johtuu

poistoilman korkeammasta lämpötilasta ja lämmöntalteenottojärjestelmien paremmasta tehokkuudesta. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Energiasäästöjä on saatu aikaan myös siirryttäessä kuivatuksessa infrapunalaitteista ilmakeivaukseen. Kun esimerkiksi vaihdetaan infrapunakuivaimet OptiDry Coat High Intensity -kuivaimiin, energiansäästö on noin 50 %. (Valmet 2021g.) Ilmakeivaimissa käytettävien suuttimien lämmönsiirtokapasiteetti ylittää perinteisten suuttimien kapasiteetin noin 40 %:lla, mikä takaa runsaasti kuivatustehoa pienessä tilassa. Myös 450 °C kuivausilmassa ilmakeivain on noin 20 % tehokkaampi infrapunakuivaimen verrattuna. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Kuvassa 10 on vertailtu OptiDry Coat High Intensity -kuivaimen ja infrapunakuivaimen energiatehokkuutta. Infrapunakuivain kuluttaa 100 % enemmän tehoa OptiDry Coat High Intensity -kuivaimen verrattuna.



Kuva 10. OptiDry Coat High Intensity ja infrapunakuivain tehokkuus (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).

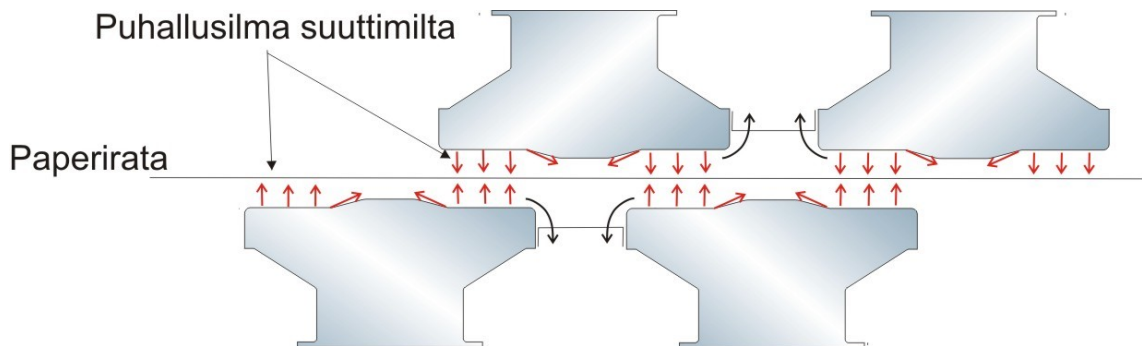
OptiDry -kuivaimet antavat erinomaisen kuivauskapasiteetin, energiatehokkuuden, lopputuotteen laadun, ajettavuuden, helpon sekä halvan

huollettavuuden, pienemmän palovaaran ja ympäristöystävällisemmän lähestymistavan muihin kuivaimiin verrattuna. (Valmet 2021e.)

4 SUUTTIMET

Kaikkien aiemmin mainittujen OptiDry -kuivainten puhalluskuivatustekniikka perustuu suuttimien toimintaan. Paperirata kuivataan puhaltamalla kuumaa ilmaa suuttimien kautta kohti rataa. Suuttimet toimivat ylipaineperiaatteella ja työntävät radan pois kantopinnaltaan. Tasainen puhallusprofiili takaa kosketuksettoman kuivauksen ja hyvän lämmönsiirron koneen poikki- ja pituussuunnassa. Ilma palaa takaisin kiertojärjestelmään suuttimien välissä olevien imualueiden kautta. Alueet on peitetty reikälevyillä, jotka estävät paperipalojen pääsyn kiertoilmajärjestelmään. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Kuvassa 11 on esitetty kaksipuoleisen ilmakeivaimen paperirata, joka leijuu suuttimien välissä koskematta niihin. Kaksipuoleisen kuivaimen etuna on se, että suuttimien etäisyys rataan on mekaanisesti lukittu. Yksipuoleisilla kuivaimilla etäisyys pitää hallita suutinpaineen ja poistoilman paineen suhteella. CFD-laskenta on tähän hyvä työkalu. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

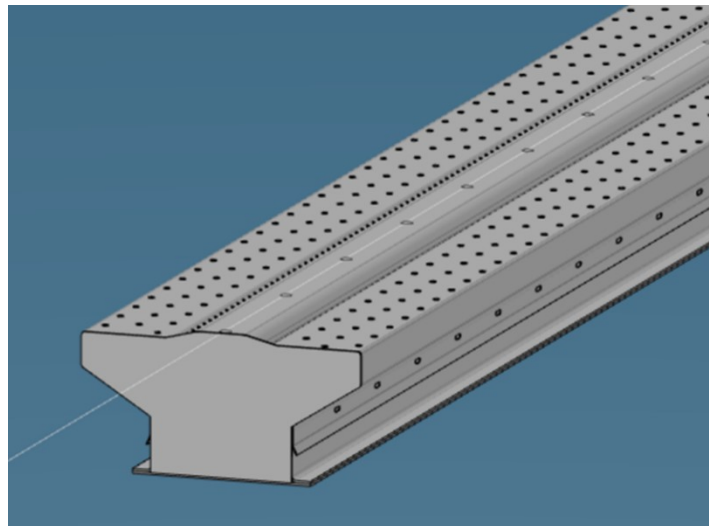


Kuva 11. Kaksipuoleisen ilmakeivaimen suuttimien toimintaperiaate (Valmetin sisäinen tietokanta 2021).

Ilmakeivainten kuivatuskapasiteettiin vaikuttavat puhallusnopeus sekä -lämpötila. Puhallusilman minimipuhallusnopeus 35 m/s, mutta suurempi puhallusnopeus parantaa ajettavuutta. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Tässä työssä keskityttiin Valmetin puhalluskuivaus-, ilmankäntö- ja vastapuhallussuuttimiin, joista oli olemassa useita eri sovelluksia erilaisiin käyttötarkoituksiin. Nämä suuttimet tuovat lisäkuivatuskapasiteettia ja energiatehokkuus paranee verrattuna muihin kuivatusmenetelmiin ja erilaisiin suutinmalleihin. (Valmetin oma tietokanta 2021.)

Puhalluskuivaussuuttimet koostuvat päätylevyistä, pohjalevystä, pintalevystä sekä sisäosasta. Pohjalevyssä on painekanavat tasaisin jakovälein ja pintalevyssä on reiät, joista puhalletaan ilmaa kuivattavalle paperiradalle. Kaikkien puhalluskuivaussuuttimien pintalevyjen reikien geometriat eroavat eri sovelluksien välillä. Puhalluskuivaussuuttimet ovat leveitä, joten lämmönsiirtoala on myöskin leveä. Kuvassa 12 näkyy Puhalluskuivaussuutin 3.0:n 3D-malli. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)



Kuva 12. Puhalluskuivaussuutin 3.0:n 3D-malli.

Suuttimien kokonaisleveys sekä suuttimien keskiosan leveys vaihtelee mallista riippuen. Esimerkiksi puhalluskuivaussuuttimissa keskiosa on huomattavasti kapeampi verrattuna ilmankäntö- ja vastapuhallussuuttimiin. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

Puhalluksen ollessa päin kuivattavaa kartonkia, jää niin kutsuttu seinäsuihkunopeus pieneksi. Jos puhallusta saataisiin käännettyä kartongin

suuntaan, lämmönsiirto jatkuisi tehokkaana pidempään. Suuttimia optimoidessa tärkeinä muuttujina ovat esimerkiksi suuttimien leveys, reikärivistöjen määrä, reikäkoko sekä puhallusten suunta. (Valmetin sisäinen tietokanta 2021.)

5 LÄMMÖN- JA MASSANSIIRTO

Lämmönsiirto on lämpötilaerosta johtuvaa siirtoenergiaa. Aina kun väliaineessa tai väliaineiden välillä on lämpötilaero, on tapahduttava lämmönsiirtoa. Konvektio on lämmön siirtymistä virtauksen vaikutuksesta lämpimästä kylmään ja sitä tapahtuu seinän sekä virtaavan kaasun tai nesteen välillä. Konvektiivinen lämmönsiirto voimistuu jos virtausnopeus kasvaa, tai seinän pinnan ja virtauksen välinen lämpötilaero kasvaa. Pakotettu konvektio syntyy kun kaasu ohjataan ulkoisella avustuksella, esimerkiksi puhaltimella, kohti pintaa. (Incropera & DeWitt 1996, 346.)

Lämmitettäessä tai jäähdytettäessä suuripinta-alaisia tuotteita suoritetaan se usein suuttimista koostuvissa laitteissa. Suutinreiät voivat olla joko pyöreitä tai rakomaisia, mutta tässä työssä keskityttiin pyöreiden suutinreikien toimintaan. Suuttimista virtaava ilma törmää pystysuunnassa kuivattavan tuotteen pintaan mahdollistaen lyhyet virtausreitit ja siten suhteellisen suuren lämmönsiirtoasteen. (Martin 1977, 2.)

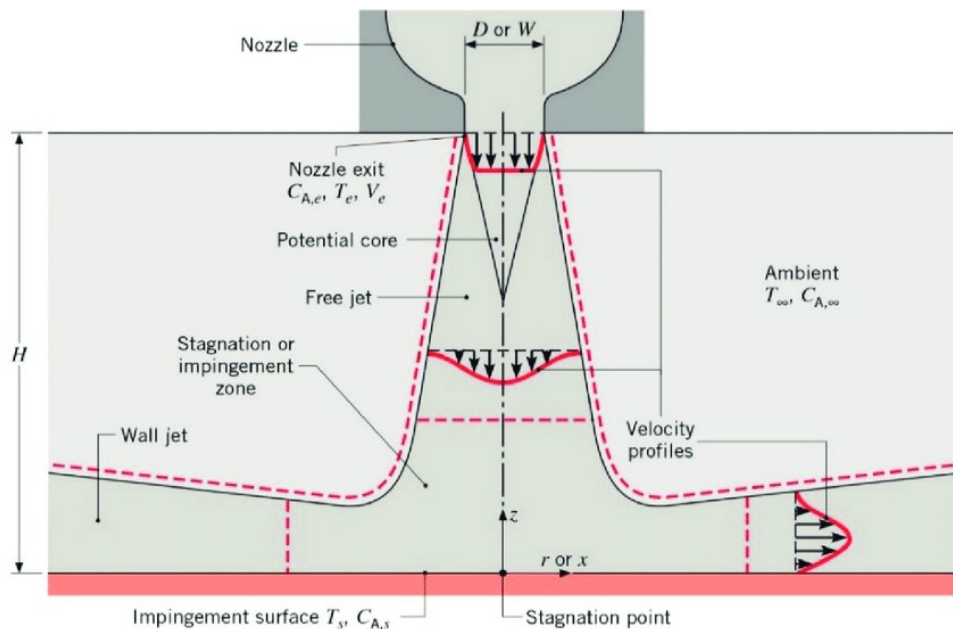
Yksittäistä kaasusuihkua tai tällaisten suihkujen ryhmää voidaan käyttää parannettujen lämmön- ja massansiirtokertoimien saavuttamiseksi konvektiivisessa jäähdytyksessä, lämmityksessä tai kuivauksessa. Käyttökohteina on esimerkiksi paperituotteiden kuivatus. Kaasusuihkut päästetään pyöreästä suutinreiästä, jonka ulostulossa on tunnusomaista tasainen nopeusprofiili. (Incropera & DeWitt 1996, 388.) Jotta voidaan suunnitella niin teknisesti kuin taloudellisestikin optimaalinen suutin, tarvitaan tietoa lämmön- ja massansiirtoasteen riippuvuudesta ulkoisiin muuttujiin. Kaasun virtausnopeus, suutinreiän halkaisija, reikien etäisyys toisistaan sekä etäisyys kuivattavan tuotteen pinnasta ovat päämuuttujia. Lisäksi huomioon on otettava massavirta sekä kaasun laji ja tila. (Martin 1977, 2–6.)

Yksittäisistä pyöreistä suutinrei'istä tuleva suihku voidaan jakaa virtauksen perusteella kolmeen ominaiseen alueeseen joita ovat vapaasuihkualue, pysähtymisvirtausalue sekä sivuttaisen virtauksen alue pysähtymisalueen ulkopuolella, jota kutsutaan yksinkertaisesti seinäsuihkualueeksi. Teknisesti

realistisissa olosuhteissa suutinreikien ulostuloaukosta kehittyvä vapaa suihku on turbulenttista. (Martin 1977, 2.)

Suutinryhmistä tulevassa virtauksessa on myös samat kolme ominaista virtausaluetta kuin yksittäisissä suuttimissa. Vapaasuihkualueen, pysähtymisvirtausalueen ja seinäsuihkualueen lisäksi on myös toissijaisia pysähtymisalueita, joissa vierekkäisten suuttimien seinäsuihkut törmäävät toisiinsa. Toissijaisille pysähtymisalueille on ominaista virtauksen lisääntyminen. Erityisesti pienemmillä suutinreikien välisillä etäisyyksillä tämä voi johtaa huomattaviin reaktioihin muilla virtausalueilla. (Martin 1977, 5.)

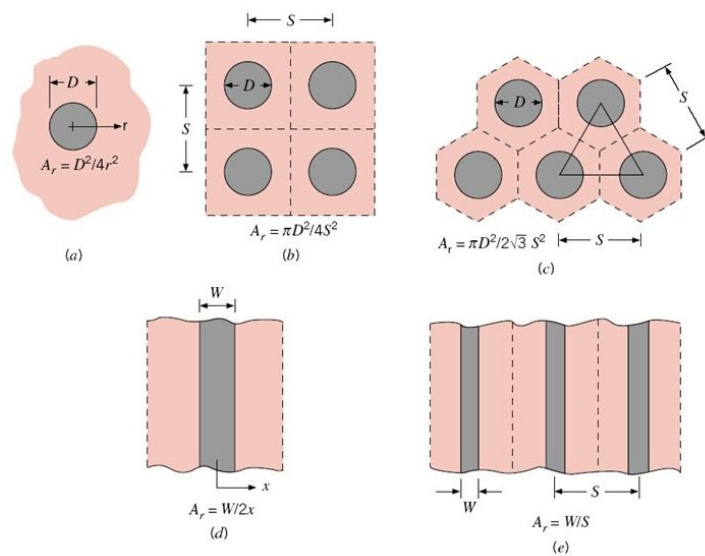
Usein suutinryhmistä tulevat suihkut päästetään tilavuuteen, jota rajoittavat kuivattava kohdepinta sekä suutinlevy, josta suihkut ovat peräisin. Lämmön siirtymisen kokonaisaste riippuu voimakkaasti tavasta, jolla käytetty kaasu poistetaan järjestelmästä. Suotava tilanne on sellainen, jossa vierekkäisten suuttimien välinen tila on avoin ympäristölle mahdollistaen jatkuvan ylösvirtauksen ja käytetyn kaasun suoran poiston. Kuvassa 13 on esitetty suuttimen virtauksen eri alueet sekä virtauksen kulku. (Incropera & DeWitt 1996, 388.)



Kuva 13. Suuttimen virtaukset (Incropera & DeWitt 1996, 387).

Kun virtauksen etäisyys suuttimen aukosta kasvaa, liikemäärä ja ympäristö muuttuvat aiheuttaen suihkun levenemisen lineaarisesti. Pysähdysvyöhykkeellä virtaukseen vaikuttaa kohdepinta ja virtaus hidastuu ja kiihtyy normaalissa (Z) ja poikittaisessa (r tai x) suunnassa vastaavasti. Vaakasuora kiihtyvyys ei voi jatkua loputtomiin ja kiihtyvä virtaus muuttuu pysähtymisvyöhykkeellä hidastuvaksi seinäsuihkuksi. Näin ollen siis poikittaisen virtauksen kasvaessa pinnan suuntaiset nopeuskomponentit kasvavat nolosta johonkin maksimiin ja vaimenevat sen jälkeen takaisin nolaa. Virtauksen aluetta, johon olosuhteet eivät vaikuta kutsutaan vapaaksi suihkuksi. (Incropera & DeWitt 1996, 388.)

Kuvassa 14 on esitetty suutinreiät ylhäältä päin. Kuvassa on yksittäinen pyöreä suutin, yksittäinen urasuutin, säännölliset pyöreät suuttimet sekä säännölliset urasuuttimet. Yksittäisille suuttimille paikalliset ja keskimääräiset konvektiotertoimet liitetään mihin tahansa arvoon $r > 0$ ja $x > 0$. Säännöllisten suuttimien ryhmälle symmetria sanelee vastaavat paikalliset ja keskimääräiset arvot kullekin katkoviivalla rajatulle yksikkösolulle. Suurelle määrälle neliömäisiä tai tasasivuisia porrastettuja pyöreitä suihkuja yksikkösolut vastaavat neliöitä tai kuusikulmioita. Olennainen geometrinen parametri on suhteellinen pinta-ala, joka määritellään suuttimen ulostulon poikkileikkausalan ja solun pinta-alan suhteena. Kussakin kuvan tapauksessa S tarkoittaa suuttimien välistä jakoa. (Incropera & DeWitt 1996, 389.)



Kuva 14. Suutinreikien pinta-alan määrittäminen (Incropera & DeWitt 1996, 388).

Suutinryhmien ja yksittäisten suuttimien välillä on havaittu yhteensopivuus lämmön- ja massansiirtokertoimien välillä niin kauan kun suhteellinen suuttimen ja kuivattavan pinnan välinen etäisyys H/D pysyy tietyn raja-arvon $(H/D)_{lim}$ alapuolella. Suuremmilla etäisyyksillä $H/D > (H/D)_{lim}$ yhden pyöreän suuttimen siirtokertoimet pienenevät nopeammin kuin vastaavat ryhmien arvot. Rajaetäisyys $(H/D)_{lim}$ on suhteellisen suutinalueen f funktio. (Martin 1977, 19.)

$$\left(\frac{H}{D}\right)_{lim} = 0,6 \times \sqrt{f}$$

Kaava 1. Rajaetäisyys $(H/D)_{lim}$.

Käsitteellä optimaalinen tilajärjestely tarkoitetaan geometrinen muuttujien yhdistelmää, joka tuottaa suurimman keskimääräisen lämmön- tai massansiirtokertoimen tietylle puhaltimen nimellisarvolle kuivattavan pinnan pinta-alayksikköä kohti. Tasaisesti sijoitetuissa suutinryhmissä, joissa on hyvät poistovirtausolosuhteet, on aina kolme riippumatonta geometrista muuttujaa; suuttimen halkaisija D , suuttimien välinen keskinäinen etäisyys L_T ja suuttimen välinen etäisyys kuivattavaan pintaan H . (Martin 1977, 45.)

6 CFD-LASKENTA

Projekti perustuu aiempaan Valmetin ja EDRMedeson yhdessä toteuttamaan Air Dryer Simulation Workflow Development: Sprint 1 -tutkimukseen, jonka tavoitteena oli toistaa luotettavasti CFD-simuloinnilla Valmetin kokeellisten suutintestien asetelmaa.

6.1 Air Dryer Simulation Workflow Development: Sprint 1

Kokeellisissa suutintesteissä Valmetin tutkimuslaitoksella tutkittiin Alfasimulaattorilla Puhalluskuivaussuutin 3.0:n lämmönsiirtokykyä. Tutkimuksessa kehitettiin CFD-simulaatio toistamaan näiden suutinkokeiden ympäristö. Simulaatioympäristö sisälsi laatikon, jossa oli ilmanottoaukko takana sekä ilmanjakokanava, joka jakoi kuumaa ilmaa kolmelle suuttimelle. Suuttimet puhalsivat kuumaa ilmaa alumiinilevyille, joka taas siirsi lämpöä sen päällä oleville alumiinipalkeille. Palkkien päällä sijaittivat lämpötila-anturit. Levystä ilmavirta simuloitiin kääntymään ilman poistoaukkoon ja poistumaan tätä kautta järjestelmästä. Lämpötilamuutos palkeissa mitattiin ja käytettiin lämmönsiirtokertoimien arviointiin.

Mittaamalla lämpötilaa ajan kuluessa ja säätämällä ilmavirtaa lämmönsiirtokerroin α voidaan laskea jokaiselle Alfasimulaattorin mittapisteelle kaavan 2 mukaisesti.

$$\alpha = \frac{mc_p(T_{a2} - T_{a1})}{\Delta t A \Delta T_{ln}}$$

Kaava 2. Lämmönsiirtokerroin α käsin laskettuna.

CFD-simulaatiossa lämmönsiirtokerroin laskettiin suoraan alumiinin pinnalta kaavalla 3.

$$a = \frac{q}{T_a - T_\infty}$$

Kaava 3. Lämmönsiirtokerroin α CFD-simulaatiossa laskettuna.

Jotta voitiin vertailla CFD-simulaation tuloksia Alfasimulaattorilta saatujen kokeiden tuloksiin, alumiinilevy jaettiin osioihin, jotka olivat yhteensopivia Alfasimulaattorin alumiinipalkkien sijainteihin, ja alojen keskiarvo laskettiin kullekin palkille.

$$a_{bar_x} = \frac{1}{A_{bar}} \int_0^A a_i dA$$

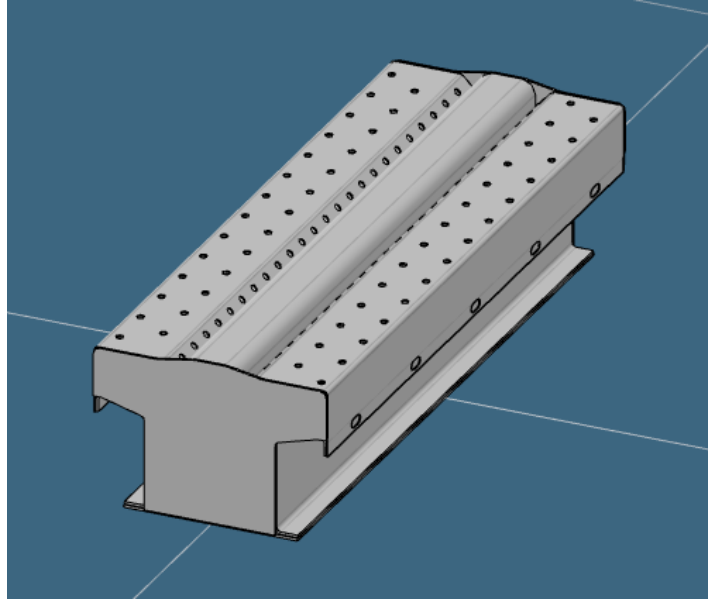
Kaava 4. Lämmönsiirtokerroin alumiinipalkeittain.

CFD-simulaatio pystyi toistamaan kokeellisista suutintesteistä saatuja tuloksia tarpeeksi tarkasti ja todettiin luotettavaksi Puhalluskuivaussuutin 3.0:n kohdalla.

Tämän tutkimuksen pohjalta oli tarkoitus yleistää, parantaa ja optimoida suunniteltua CFD-simulaatiota erilaisten suuttimien lämmönsiirtokyvyn arviointiin. Lopullista työnkulkua käytetään arvioimaan useiden eri suuttimien suorituskykyä tässäkin opinnäytetyössä.

6.2 CFD-simulaation yleistäminen erilaisille suuttimille

Opinnäytetyön alussa EDRMedesolle mallinnettiin 500 mm pituiset 3D-mallit neljästä eri suuttimesta, jotka olivat jo aiemmin Sprint 1:ssä käytetyn Puhalluskuivaussuutin 3.0:n lisäksi Puhalluskuivaussuutin 4.0, Ilmankäntöpuhallussuutin 2.2 sekä Vastapuhallussuutin 2.1. Mallintamiseen käytettiin Catia V6 -mallinnusohjelmistoa. Kuvassa 15 on 500 mm pituinen Vastapuhallussuutin 2.1, jota simuloitiin Ansys Fluentilla.



Kuva 15. Vastapuhallussuutin 2.1.

Mallinnettujen suuttimien CFD-simuloinneissa käytettiin 50 m/s puhallusnopeutta ja 7 mm etäisyyttä suuttimen ja kartongin välillä. Simulaatioiden tuloksissa vertailtiin eri suutinmallien lämmönsiirtokerroimia, massavirtaa sekä paineen putoamista. Lämmönsiirtokerroin- ja paineprofiilit perustettiin alakeskiarvoiseen dataan lokaatioista, joissa alumiinipalkit ovat sijoitettuina kokeellisissa suutintesteissä. Palkkien välinen etäisyys oli 1,3 mm ja yhden palkin leveys 30 mm. Massavirta jokaisessa reiässä on säilytetty tasaisena simulaatioissa.

Neljästä eri suuttimesta saatiin CFD-simulaatiolla vertailukelpoisia tuloksia. Taulukossa 1 on esitetty suuttimien paine- sekä massavirta-arvoja staattisessa tilanteessa. Vastapuhallussuutin 2.1:llä havaittiin olevan korkein suutinpaine kaikista malleista ja Ilmankäntöpuhallussuuttimella 2.2 oli matalin suutinpaine. Kokonaismassavirta pinta-alaa kohden taas oli korkein Ilmankäntöpuhallussuutin 2.2:lla.

Taulukko 1. Suutinmallien paineiden vertailu, staattinen tilanne.

	Suutinpaine (Pa)	Massavirta pinta-alaa kohden (kg/m ² s)	Leijutusaine (Pa)
Puhalluskuivaussuutin 3.0	1418	0.758	322
Puhalluskuivaussuutin 4.0	1400	0.695	345
Ilmankäntöpuhallussuutin 2.2	1314	0.963	389
Vastapuhallussuutin 2.1	1439	0.709	182

Taulukossa 2 on esitty suuttimien lämmönsiirtokerroimia staattisessa tilanteessa. Vastapuhallussuutin 2.1:llä oli korkein keskimääräinen lämmönsiirtokerroin, mutta myös suurin tilavuus. Puhalluskuivaussuutin 4.0:lla havaittiin alhaisin lämmönsiirtokerroin, mutta myös tilavuus on pienin. Tilavuus on suorassa suhteessa tuotteen painoon eli materiaalikustannuksiin ja Puhalluskuivaussuutin 4.0 on selvästi kustannustehokkain testatuista suuttimista. Ilmankäntöpuhallussuuttimella 2.2 haetaan mahdollisimman tehokasta leijutusainetta, sillä se on käntökuivaimen suutin. Vastapuhallussuutin 2.1 on taas kaksipuoleisen kuivaimen suutin, ja sillä pyritään mahdollisimman korkeaan lämmönsiirtoon ilman merkittävää leijutusainetta.

Taulukko 2. Suutinmallien lämmönsiirtokerroimien vertailu, staattinen tilanne.

	Lämmönsiirtokerroin (W/m ² K)	Tilavuus pinta-alaa kohden (m ³ /m ² (kartonki))	Referenssitilavuus (Puhalluskuivaussuutin 3.0) (%)
Puhalluskuivaussuutin 3.0	202	0.00488	100 %

Puhalluskuivaussuutin 4.0	165	0.00252	51.70 %
Ilmankäntöpuhallussuutin 2.2	177	0.00550	112.79 %
Vastapuhallussuutin 2.1	215	0.00672	137.85 %

Malleja verrattiin staattisen tilanteen lisäksi myös tilanteessa, jossa kartonki liikkuu. Taulukossa 3 on esitetty suuttimien paine- sekä massavirta-arvoja ja taulukossa 4 lämmönsiirtokerroimia. Vastapuhallussuutin 2.1:lla oli edelleen korkein suutinpaine ja suurin lämmönsiirtokerroin. Matalin suutinpaine oli Ilmankäntöpuhallussuutin 2.2:lla, mutta lämmönsiirtokerroin jäi myös matalimmaksi. Kaikissa suuttimissa, poislukien Ilmankäntöpuhallussuutin 2.2, lämmönsiirtokerroin on matalampi liikkuvassa tapauksessa. CFD-simulaatio tukee käytännön kokeita todellisessa ajotilanteessa, jolloin Ilmankäntöpuhallussuutin 2.2:den lämmönsiirto on parempi radan liikkeessä suurella nopeudella.

Taulukko 3. Suutinmallien paineiden vertailu, liikkuva tilanne.

	Suutinpaine (Pa)	Massavirta pinta-alaa kohden (kg/m ² s)	Leijutusaine (Pa)
Puhalluskuivaussuutin 3.0	1395	0.758	335
Puhalluskuivaussuutin 4.0	1409	0.695	335
Ilmankäntöpuhallussuutin 2,2	1316	0.863	368
Vastapuhallussuutin 2.1	1450	0.709	215

Taulukko 4. Suutinmallien lämmönsiirtokertoimien vertailu, liikkuva tilanne.

	Lämmönsiirtokerroin (W/m ² k)	Tilavuuspinta-ala kohden (m ³ /m ² (kartonki))	Referenssitilavuus (Puhalluskuivaussuutin 3.0) (%)
Puhalluskuivaussuutin 3.0	194	0.004875	100.00%
Puhalluskuivaussuutin 4.0	149	0.002520161	51.70 %
Ilmankäntöpuhallussuutin 2.2	183	0.005498534	112.79 %
Vastapuhallussuutin 2.1	205	0.00672043	137.85 %

Suuttimista oli mahdollista saada luotettavia ja keskenään vertailukelpoisia tuloksia kehitetyllä CFD-simulaation työkalulla. Jotta CFD-simulaatiota voidaan käyttää laajasti eri suuttimien lämmönsiirron tutkimiseen, täytyy simulaatioita tehdä useille eri mittauspisteille erilaisilla puhallusnopeuksilla ja etäisyyksillä.

6.3 Alfasimulaattoritestaus Puhalluskuivaussuutin 4.0

Alfasimulaattorilla suoritettiin suutinkokeet Puhalluskuivaussuutin 4.0:lle, jossa testattiin yhteensä 18 eri mittauspistettä, jotka sisälsivät useita puhallusnopeuksia sekä useita etäisyyksiä suutinpinnan ja kartongin välillä. Alfasimulaattori -testilaitetta käytetään ilmakeivaimen suuttimien konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen määrittämiseen. Laitteessa suutin asetetaan puhaltamaan kuumaa ilmaa halutulla puhallusnopeudella. Tämän jälkeen alumiinilevy, jonka päällä on alumiinipalkkeja, asetetaan halutun etäisyyden päähän puhaltavasta suuttimesta sen päälle. Alumiinipalkkien päällä on

kiinnitettynä lämpötila-anturit, jotka mittaavat 20 eri mittapistestä lämpötiloja. Saatujen tulosten perusteella pystytään määrittämään lämmönsiirtokerroin jokaiselle mittauspisteelle. Testiympäristö vastaa CFD-simulaatioon rakennettua ympäristöä.

Kuvassa 16 on Alfasimulaattori, jossa on kiinnitettynä kolme eri suutinta. Keskimäinen suutin on mitattava Puhalluskuivaussuutin 4.0. Testauksessa käytettiin 200 °C puhallusilmaa, kolmea eri puhallusnopeutta sekä kuutta eri etäisyyttä suutinpinnan ja mittaavan alumiinilevyn välillä. Mittauksia tuli siis yhteensä 18 kappaletta. Puhallusnopeudet olivat 40 m/s, 50 m/s sekä 60 m/s ja etäisyydet 5 mm, 7 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm ja 30 mm.

Alfasimulaattorilla testattiin Puhalluskuivaussuutin 4.0, jotta tuloksia voidaan verrata CFD-simulaatioista saataviin tuloksiin eri mittauspisteille. Jos tulokset ovat yhtenevät, CFD-simulointia voidaan pitää luotettavana tämän suuttimen simuloinnissa ja käyttää jatkossa myös muiden suuttimien lämmönsiirtokertoimien määrittämisessä.



Kuva 16. Alfasimulaattori, jossa mitattava suutin keskellä.

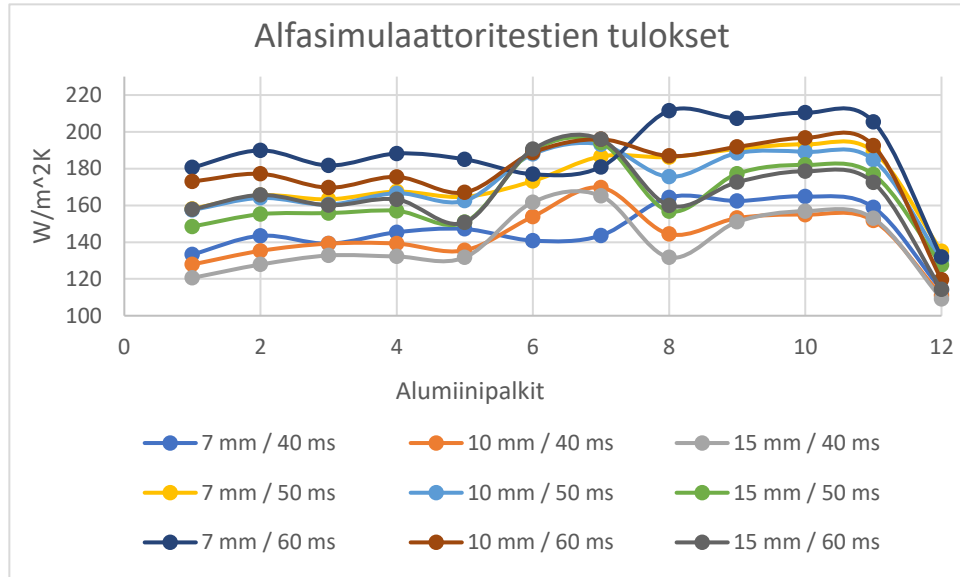
Kuvassa 17 näkyy Alfasimulaattori, kun mittaus on käynnissä. Alumiinipalkit ovat suuttimien päällä ja niiden sisällä olevien lämpötila-antureiden johdot menevät dataloggerille. Dataloggeri tallettaa 20 palkin lämpötilan kahden sekunnin välein. Mittausaika on noin 100 sekuntia, jolloin palkkien lämpötila ehtii nousta noin 40 °C. Mittausdata siirretään dataloggerilta Exceliin analysoitavaksi mittausten päätyttyä.



Kuva 17. Alfasimulaattori käytössä.

Analysoinnissa oletettiin lämpöhäviöiden olevan mitättömiä, jolloin kaikki siirtynyt lämpö nostaa alumiinipalkkien lämpötilaa. Lisäksi oletettiin alumiinin lämmönjohtavuuden olleen niin suuri, ettei palkkien korkeussuuntaan syntynyt lämpögradienttia. Näillä oletuksilla palkkien lämpötilan nousunopeuden, eli lämmönsiirtonopeuden, avulla määritettiin lämmönsiirtokerroin.

Kaikkien mittauspisteiden tulokset koostettiin Excelissä kuvaajiksi. Kuviossa 1 on esitetty lämmönsiirtokertoimet alumiinipalkkien funktiona yhdeksässä eri mittauspisteessä. Lämmönsiirtokertoimet on laskettu vain palkeista, jotka ovat suoraan suuttimen päällä tulosten luotettavuuden parantamiseksi.



Kuvio 1. Alfasimulaattoritestien lämmönsiirtokertoimet alumiinipalkkien funktiona.

6.4 CFD-simulaatiot Puhalluskuivaussuutin 4.0 - staattinen tilanne

Alfasimulaattorissa suoritettiin mittauksia yhteensä 18 eri mittauspisteelle Puhalluskuivaussuutin 4.0:lla. CFD-simulaation tulokset haluttiin todentaa useissa koepisteissä, joten Alfasimulaattoritestien jälkeen kyseiselle suuttimelle tehtiin CFD-simulaatioita usean eri mittauspisteen olosuhteissa. Simulaatioihin käytettiin ANSYS Fluent -ohjelmistoa ja yhden simulaation tuottamiseen alusta loppuun kului noin 3-5 tuntia.

Catia V6 -ohjelmassa mallinnettu 3D-suutinmalli vietiin .stp -muodossa ANSYS SpaceClaim -ohjelmaan. SpaceClaimissa kappaleen geometria yksinkertaistettiin poistamalla esimerkiksi turhia pyöreitä reunoja, yhdistämällä geometrian eri osat yhdeksi yhtenäiseksi osaksi ja jakamalla pitkä suutin periodisiin osiin. Periodisuus laskettiin kaavan 5 avulla, jossa X tarkoittaa vinojen

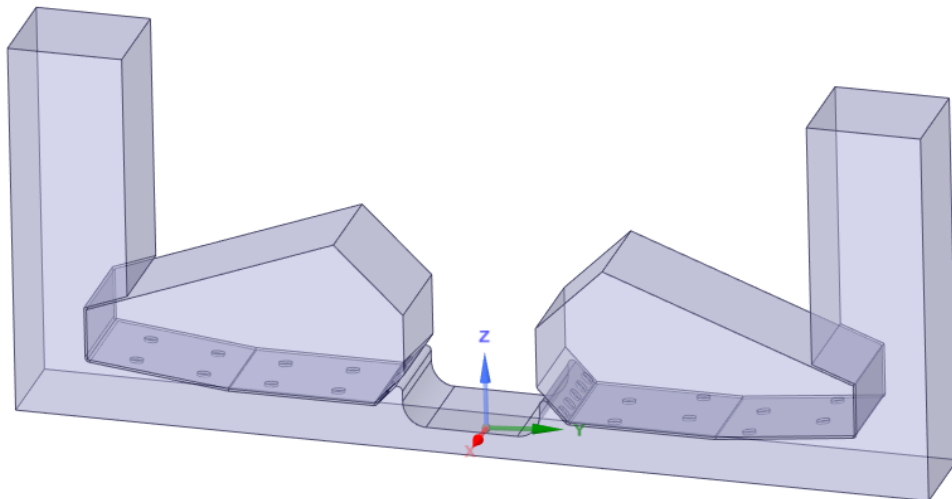
reikien määrää, Y suorien reikien määrää, A vinojen reikien etäisyyttä toisistaan ja B suorien reikien etäisyyttä toisistaan.

$$X \times A = Y \times B$$

Kaava 5. Periodisuuden laskeminen.

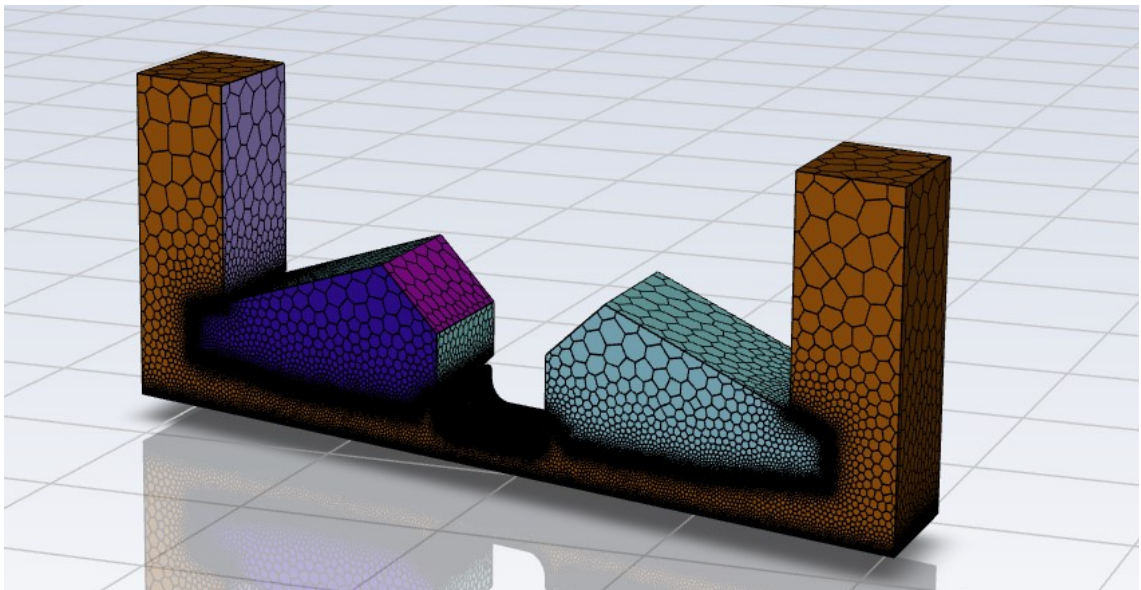
Täysin periodinen malli ei ole aina mahdollinen, mutta virhemarginaalin haluttiin pysyvän mahdollisimman pienenä. Puhalluskuivaussuutin 4.0:n periodinen malli oli 68 mm pitkä ja periodissa oli 2 % virhemarginaali.

Geometria leikattiin yhden periodin pituiseen osioon, jonka jälkeen sille luotiin niin kutsuttu fluiditilavuus. Tilavuus muokattiin muistuttamaan testitilannetta, ja kartongin etäisyys suutinlevyistä määritettiin tässä vaiheessa. Geometrian muokkauksen jälkeen pinnat nimettiin ryhmittäin. Ryhmiä olivat esimerkiksi sisääntulo- ja ulostulopinnat, kartonki, periodiset reunat, symmetriapinnat sekä suuttimen pinta. Kaikki SpaceClaimissa tehdyt toimenpiteet helpottavat laskennan suorittamista. Kuvassa 18 näkyy suuttimelle luotu fluiditilavuus.



Kuva 18. ANSYS SpaceClaimissa luotu fluiditilavuus.

Geometria vietiin muokkauksen jälkeen ANSYS Fluent -ohjelman verkotuspuolelle. Verkotuksessa geometrian pinnalle luotiin pintaverkko, periodiset ehdot, reunaehdot sekä volyymiverkko. Geometrian muuttuessa, esimerkiksi suutinpinnan ja kartongin eri etäisyyksiä simuloitaessa, täytyy verkotus tehdä uudelleen. Verkon asetukset määritettiin tietokoneen laskentakapasiteetin mukaan. Teoriassa mitä pienemmät laskentaelementit ja niin sanotusti tiukempi verkotus on, sitä tarkempia lopullisen laskennan tulokset ovat. Tämä ei kuitenkaan aina pidä paikkaansa, sillä hyvin pienillä laskentaelementeillä laskenta ei aina kovergoidu ja iterointikierrosten väliset tulokset alkavat vaihdella paljon. On siis tärkeää löytää sopiva elementtikoko, jolla tulokset ovat riittävän tarkkoja ja toistettavia. Kuvassa 19 on valmiiksi verkotettu kappale. Kuvasta voidaan huomata, kuinka verkko on tarkempaa lähellä kulmia ja reunoja ja löysempää tasaisilla pinnoilla.



Kuva 19. ANSYS Fluentilla volyymiverkotettu kappale.

Kun volyymiverkko oli luotu valmiiksi, vietiin verkotettu geometria ratkaistavaksi ANSYS Fluent -ohjelmiston ratkaisupuolelle. Ratkaisupuolella määritettiin referenssiarvoja kuten lämpötila, ilman tiheys ja tyyppi, viskositeetti sekä lämmönjohtavuus. Suuttimen sisääntuloarvoissa määritettiin suutinreikien massavirta ja ulostuloarvoissa paine. Kartongin lämpötila määritettiin jokaisessa tapauksessa 70 Celsiusasteeseen ja simulaatiot suoritettiin kartongin ollessa

staattisessa tilanteessa. Lisäksi määritettiin ja luotiin alumiinipalkkien paikat isoleikkauspintojen avulla. Alfasimulaattorissa alumiinipalkit olivat 30 mm leveitä ja 1,3 mm välein, mutta CFD-simulaatioissa käytettiin 20 mm leveitä isoleikkauspintoja, jotka olivat kiinni toisissaan tarkempien tulosten saamiseksi.

Isoleikkauspinta tarkoittaa pintaa, jolla Fluent laskee keskiarvoistetun arvon valitulle suureelle, kuten lämmönsiirtokertoimelle tai paineelle. CFD laskee siis lämmönsiirtokertoimen vastapinnalla, eikä itse alumiinipalkkien lämpenemistä. Tämä tekee jo itsessään CFD-laskennasta päällysteen kuivatuksen mallinnukseen paremmin soveltuvan ympäristön kuin Alfasimulaattoriympäristö on.

Kun kaikki tarvittavat tiedot oli syötetty Ansys Fluent ratkaisupuolelle, laskettiin simulaatio sadalla iteroinnilla. Edellä mainittu työnkulku suoritettiin yhteensä yhdeksälle eri mittauspisteelle. Mittauspisteisiin valittiin kolme eri suuttimen ja kartongin välistä etäisyyttä, jotka olivat 7 mm, 10 mm sekä 15 mm. Kaikki etäisyydet laskettiin kolmella eri puhallusnopeudella 40 m/s, 50 m/s ja 60 m/s. Lämpötilana käytettiin 473 K, mikä vastaa 200 Celciusastetta. Simulaatioita ei suoritettu kaikille 18 mittauspistelle, koska yhdeksän pisteen simulointi tuotti riittävästi vertailudataa Alfasimulaattorin tuloksiin nähden.

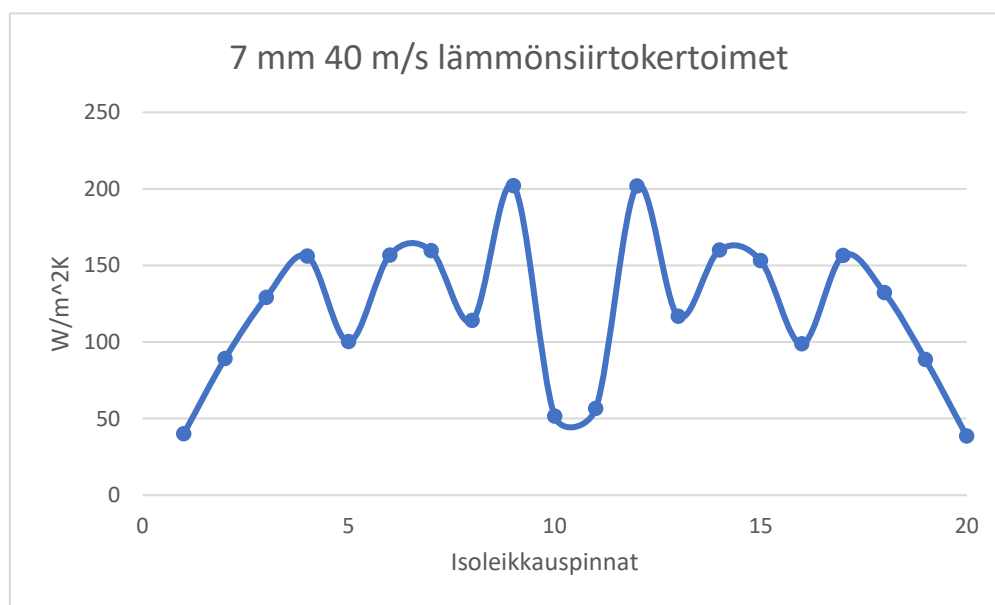
Alfasimulaattorissa laitteeseen määritettiin paine, joka vastasi tiettyä puhallusnopeutta. CFD-simulaatioissa puhallusnopeudet määritettiin massavirran avulla. Taulukossa 5 on ilmoitettu puhallusnopeudet sekä paineiden, että massavirtojen avulla.

Taulukko 5. Puhallusnopeudet paineen sekä massavirran avulla.

Puhallusnopeus (m/s)	Alfasimulaattorissa käytetty vastaava paine (Pa)	CFD-simulaatiossa käytetty vastaava yhden reiän massavirta (kg/s)
40	595	4,6075e-4
50	930	6,6796e-4
60	1339	8,0155e-4

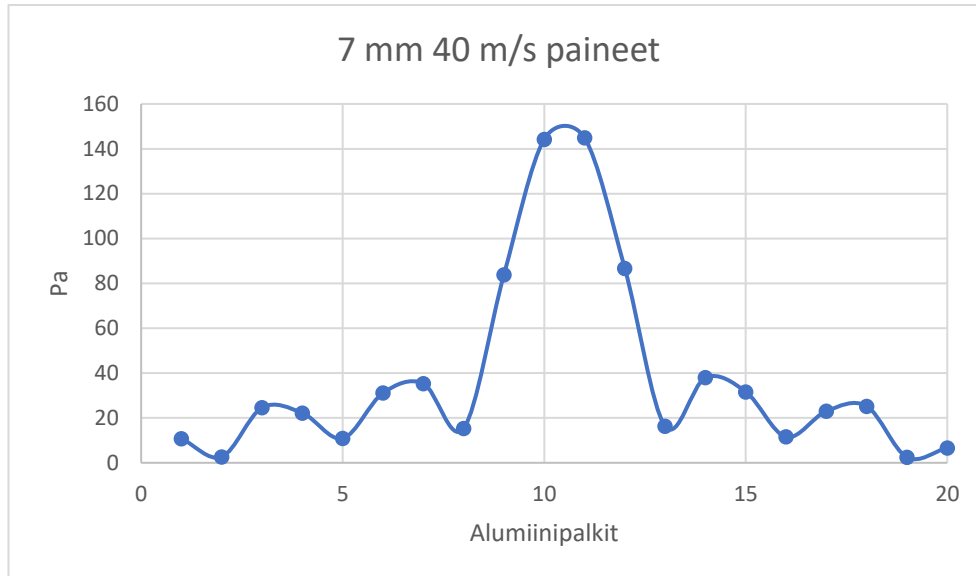
Massavirta määritettiin yhtä halkaisijaltaan 5,6 mm reikää kohden. Simulaatiossa laskettiin montako reikää käsiteltävässä geometriassa oli ja kerrottiin reikien lukumäärä haluttua puhallusnopeutta vastaavalla massavirralla.

Laskenta tuotti jokaiselle isoleikkauspinnalle jokaisesta suoritetusta iteraatiosta lämmönsiirtokerroimen. Kuviossa 2 on esitetty simulaation tuloksina saadut lämmönsiirtokerroimet isoleikkauspintojen funktiona. Jokaisen pinnan lämmönsiirtokerroin on iteroitien tuottamien lämmönsiirtokerroimien keskiarvo. Tulokset muodostavat symmetrisen käyrän, jossa lämmönsiirtokerroimet nousevat ja laskevat. Suuttimen reikien kohdissa lämmönsiirtokerroimet ovat korkeimmillaan ja matalimmillaan ne ovat suuttimen keskiosassa ja reunoissa, missä ei ole reikiä lainkaan.



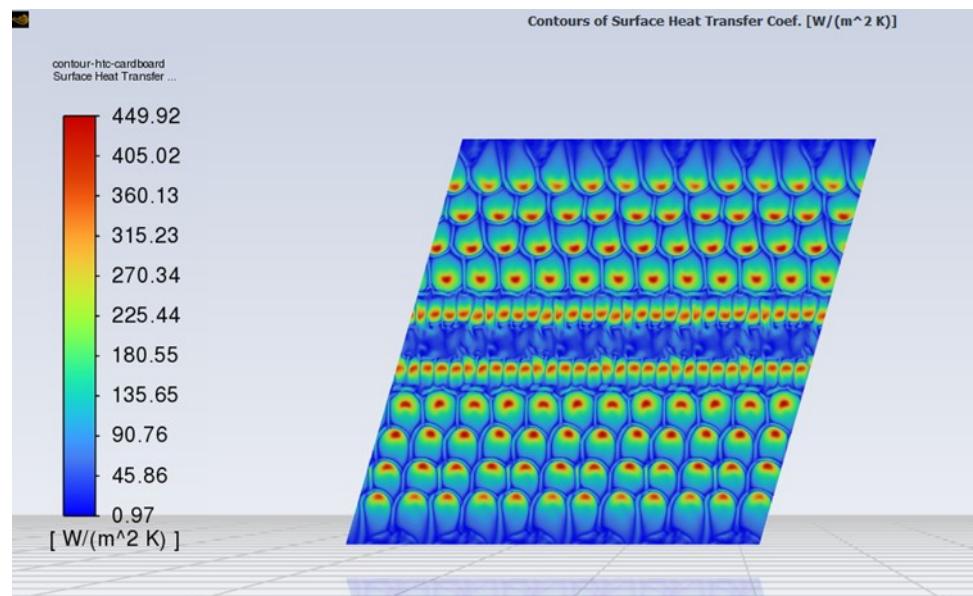
Kuvio 2. Lämmönsiirtokerroimet isoleikkauspintojen funktiona.

Laskennan tuloksista saatiin myös jokaista isoleikkauspintaa vastaava staattinen paine, sekä suutinpaineen arvo. Kuviossa 3 on esitetty paineet isoleikkauspintojen funktiona. Paineiden muodostama käyrä on symmetrinen suuttimen leveydeltä ja korkeimmat painearvot ovat suuttimen keskiosassa. Reunoja kohti paineet laskevat huomattavasti.



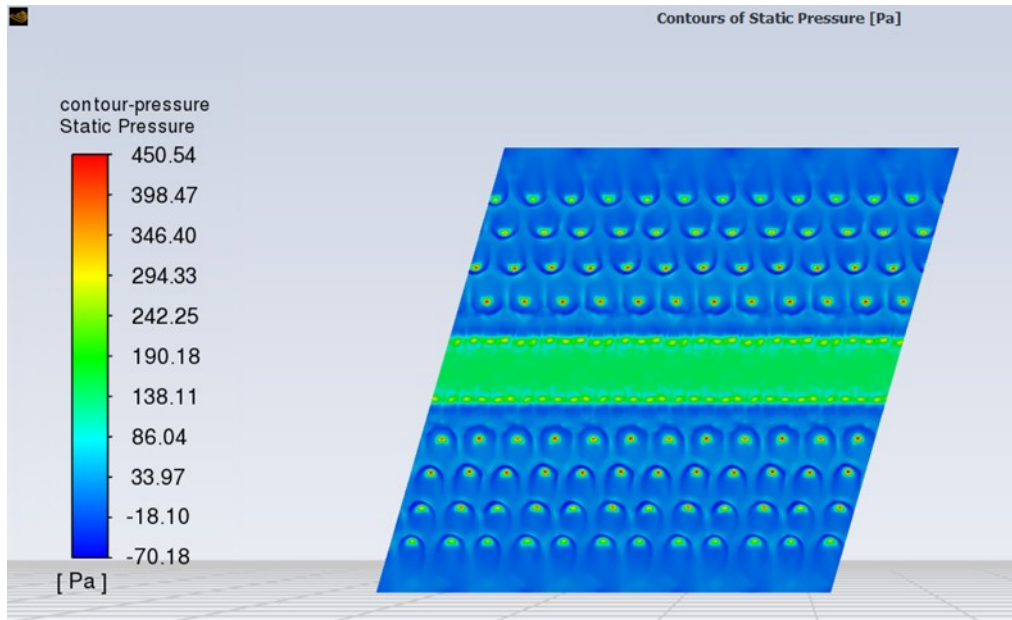
Kuvio 3. Paineet isoleikkauspintojen funktiona.

Laskennan tuloksista tuotettiin havainnollistavat kuvat, joissa saadut tulokset esitettiin suutinpintaa vastaavalla pinnalla värien avulla. Kuvasta 20 nähdään, kuinka suurimmat lämmönsiirtokertoimet ovat suutinreikien kohdalla ja pienimmät aivan suuttimen keskiosassa sekä suutinlevyn reunoilla.



Kuva 20. Lämmönsiirtokertoimien jakautuminen suutinlevyä vastaavalle pinnalle.

Kuvassa 21 on esitetty staattisten paineiden jakautuminen suutinlevyä vastaavalle pinnalle. Suurimmat paineet ovat suutinlevyn keskikohdassa sekä reikien kohdissa, kun taas muuten levyn pinnalla paineet ovat huomattavasti matalammat.



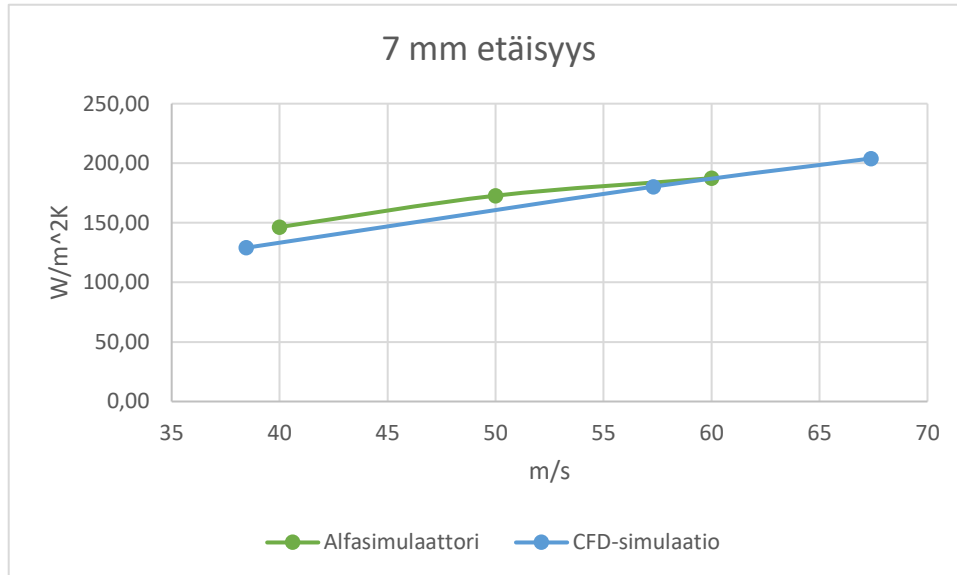
Kuva 21. Staattisten paineiden jakauma suutinlevyä vastaavalla pinnalla.

6.5 Alfasiimulaattoritestien ja sitä vastaavien CFD-simulaatioiden vertailu

Alfasiimulaattoritestien ja CFD-simulaatioiden tulokset koottiin yhteen vertailukelpoisiksi kuvioiksi. Lämmönsiirtokertoimien keskiarvo määritettiin sekä Alfasiimulaattorituloksissa, että CFD-simulaatioiden tuloksissa 360 mm leveydeltä, jolloin tulokset ovat mahdollisimman vertailukelpoisia keskenään. Alfasiimulaattorissa tämä vastaa siis 12 alumiinipalkin leveyttä ja CFD-simulaatioissa 18 isoleikkauspinnan leveyttä.

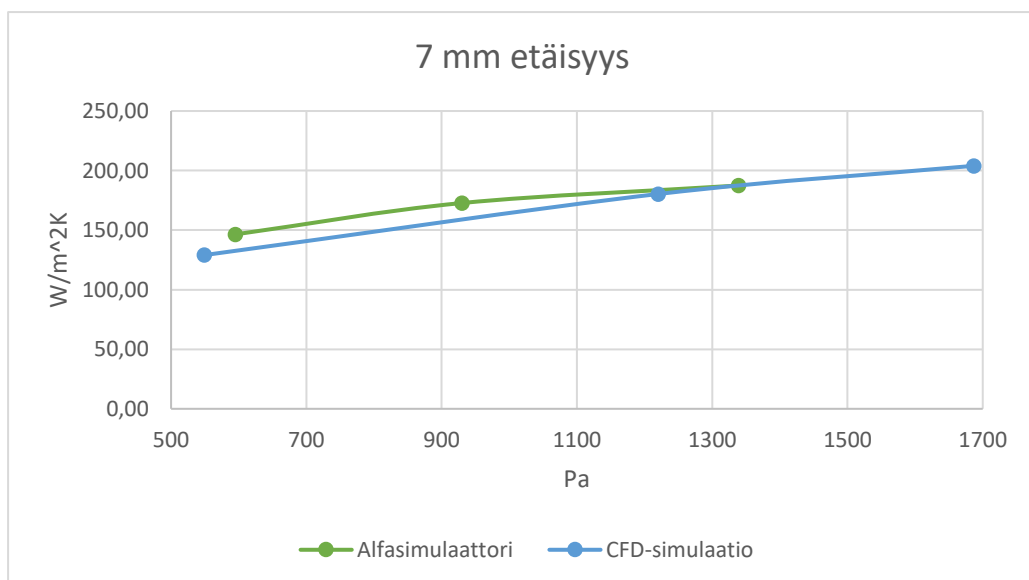
Kuviossa 4 on esitetty Alfasiimulaattoritestien sekä CFD-simulaatioiden lämmönsiirtokertoimet puhallusnopeuksien fuktiona, kun etäisyys suuttimen ja kartongin välillä on 7 mm. Alfasiimulaattoritesteistä saadut lämmönsiirtokertoimet

ovat pienemmillä puhallusnopeuksilla hieman korkeammat kuin CFD-simulaatioista saadut lämmönsiirtokertoimet. Tulokset kuitenkin yhtenäistyvät puhallusnopeuden kasvaessa.



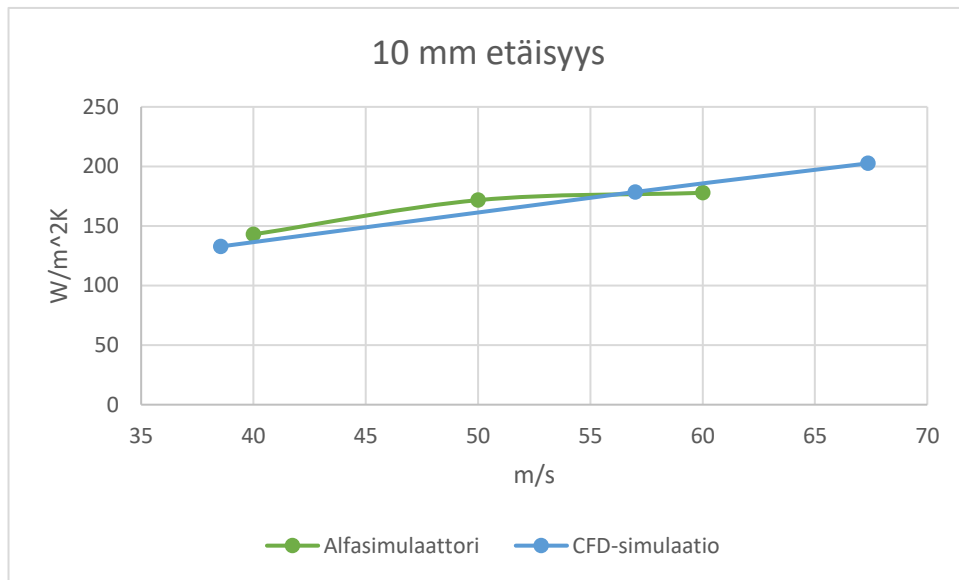
Kuvio 4. Lämmönsiirtokertoimet puhallusnopeuksien funktiona.

Kuviossa 5 lämmönsiirtokertoimet on esitetty suutinpaineiden funktiona etäisyyden ollessa 7 mm. Alfasimulaattorissa suutinpaine määritettiin käsin, mutta CFD-simulaatioissa suutinpaine saatiin laskennan tuloksista. Testien painearvot eivät siis ole täysin identtiset.



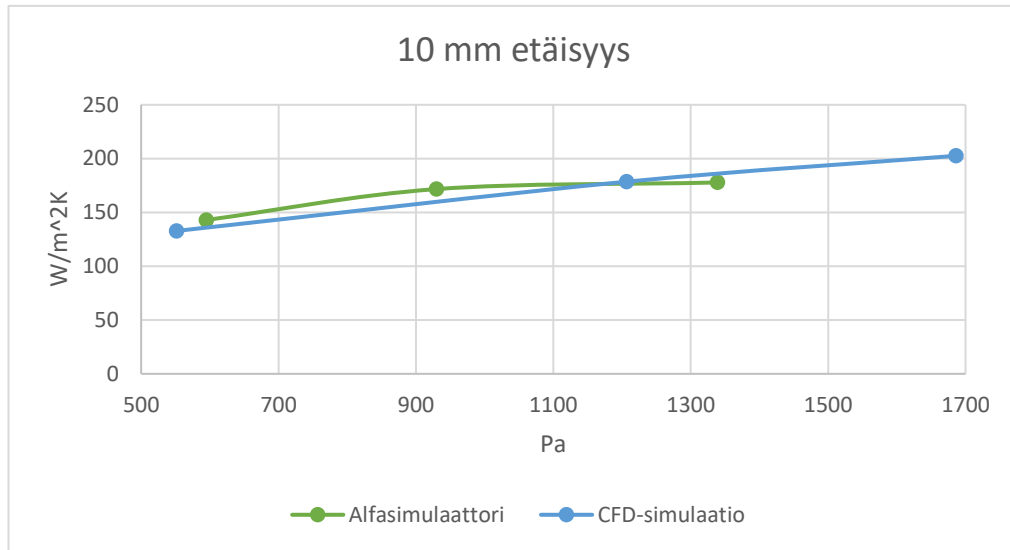
Kuvio 5. Lämmönsiirtokertoimet suutinpainneiden funktiona.

Kuviossa 6 on esitetty Alfasimulaattoritestien sekä CFD-simulaatioiden lämmönsiirtokertoimet puhallusnopeuksien funktiona 10 mm etäisyydellä. Kuvioista voidaan huomata kuinka pienemmillä puhallusnopeuksilla Alfasimulaattoritestien lämmönsiirtokertoimet ovat hieman korkeammat, mutta puhallusnopeuden kasvaessa ne laskevat CFD-simulaation tuloksia matalammalle. CFD-simulaatioiden tuloksissa ei ole huomattavissa vastaavaa.



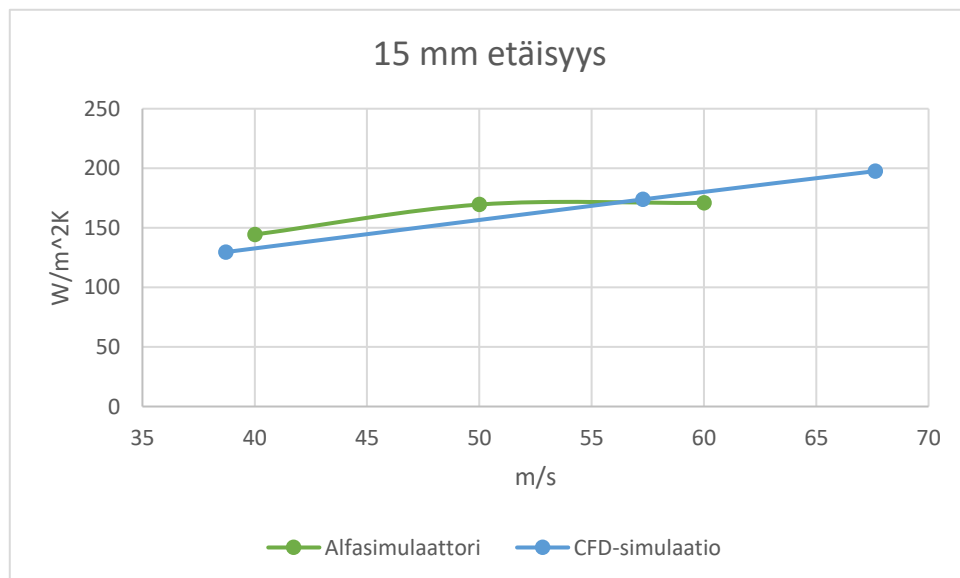
Kuvio 6. Lämmönsiirtokertoimet puhallusnopeuksien funktiona.

Kuviossa 7 lämmönsiirtokertoimet on esitetty suutinpainneiden funktiona 10 mm etäisyydellä. Tuloksissa on nähtävissä kuvion 6 ilmiö.



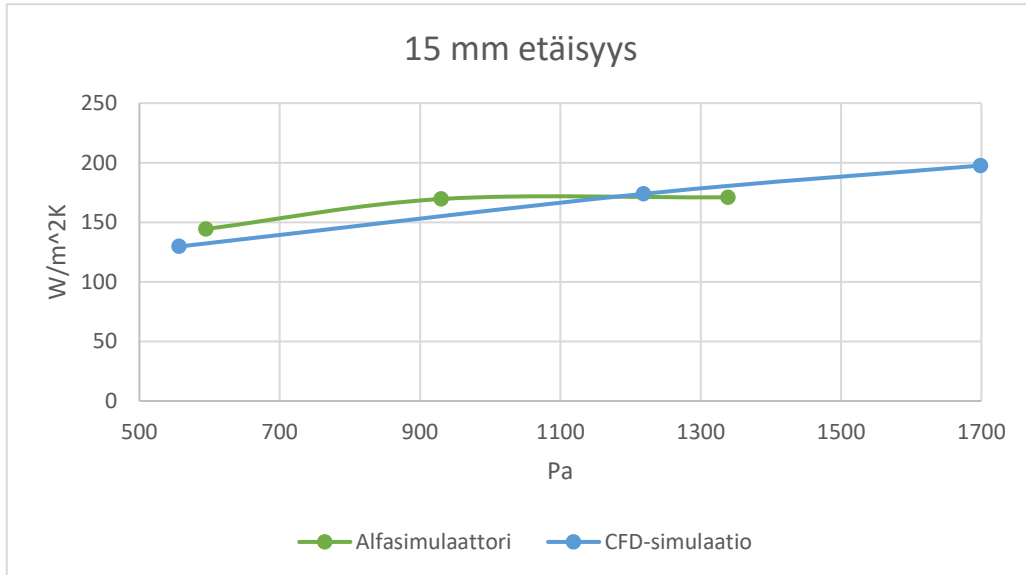
Kuvio 7. Lämmönsiirtokertoimet suutinpaineiden funktiona.

Kuviossa 8 lämmönsiirtokertoimet on esitetty puhallusnopeuksien funktiona ja etäisyys suuttimen ja kartongin välillä on 15 mm. CFD-simulaatioista saadut lämmönsiirtokertoimet jatkavat kasvuaan edelleen, mutta Alfasimulaattoritestistä saaduissa tuloksissa on huomattavissa notkahdus korkeammilla puhallusnopeuksilla.



Kuvio 8. Lämmönsiirtokertoimet puhallusnopeuksien funktiona.

Kuviossa 9 lämmönsiirtokertoimet on esitetty suutinpainneiden funktiona etäisyyden ollessa 15 mm. Kuten kuvioista 8 huomattiin, Alfasimulaattoritestien lämmönsiirtokertoimet laskevat myös suutinpaineen kasvaessa.



Kuvio 9. Lämmönsiirtokertoimet suutinpainneiden funktiona.

Tulosten havaittiin olevan yhtenevät kaikilla kolmella etäisyydellä Alfasimulaattoritestien sekä CFD-simulaation välillä. Puhallusnopeus sekä suutinpaine määritettiin kummassakin testiympäristössä eri tavalla ja tästä johtuen ne eivät täysin vastaa toisiaan. Virhemarginaali testitulosten välillä pysyi jokaisessa testipisteessä lähes vakiona etäisyydestä riippumatta ja erot ovat niin pieniä pieniä, että tuloksia voitiin vertailla keskenään.

6.6 CFD-simulaatiot lämpötilanmuutoksilla - staattinen tilanne

Puhalluskuivaussuutin 4.0 simuloitiin vielä kolmella eri lämpötilalla suuttimen ja kartongin etäisyyden ollessa 10 mm. Aiemmissa mittauksissa referenssilämpötilana käytettiin 200 °C, mutta tämän lisäksi haluttiin tutkia, miten lämpötilan muuttaminen vaikuttaa lämmönsiirtokertoimiin sekä suutinpaineisiin. Simulaatiot suoritettiin 100 °C, 300 °C sekä 400 °C lämpötiloissa staattisessa tilanteessa.

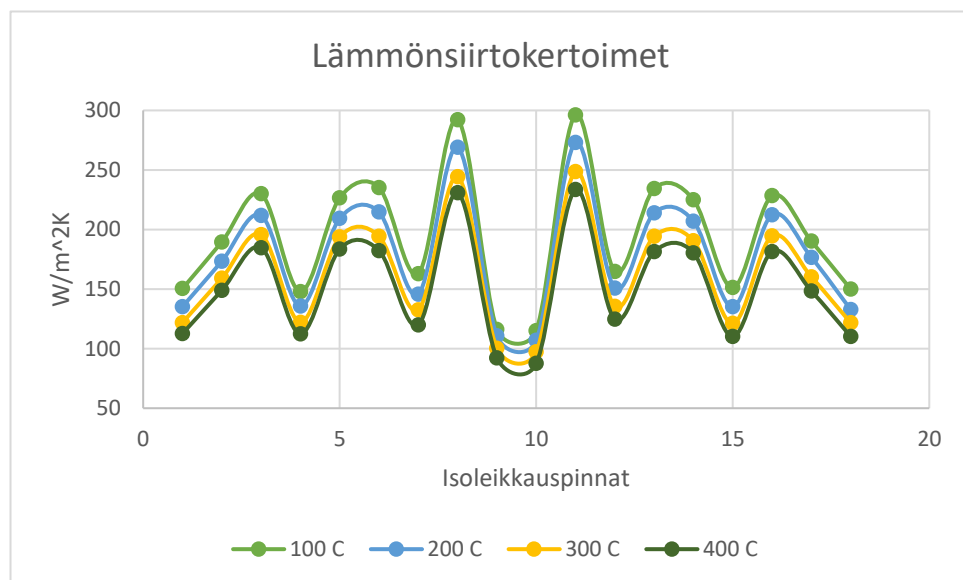
Massavirta redusoiin lämpötilalla ja jokaiselle lämpötilalle laskettiin uusi massavirta. Vertailuna pidettiin 200 °C vastaavaa virtausarvoa 0,0173668 kg/s, jolloin massavirta lämpötilan funktiona saatiin kaavalla 6.

$$\frac{0,0173668 \times (273 \text{ K} + 200)}{273 \text{ K} + T(C)}$$

Kaava 6. Massavirta lämpötilan funktiona.

100 °C lämpötilalla massavirraksi saatiin 0,022023 kg/s, 300 °C lämpötilalla 0,014336 kg/s ja 400 °C lämpötilalla 0,012206 kg/s. Massavirta siis laski lämpötilan noustessa. Muut rajaehdot sekä asetukset pidettiin täysin samoina, kuin aiemmissa staattisen tilanteen simulaatioissa ja laskenta suoritettiin 100 iteraatiolla.

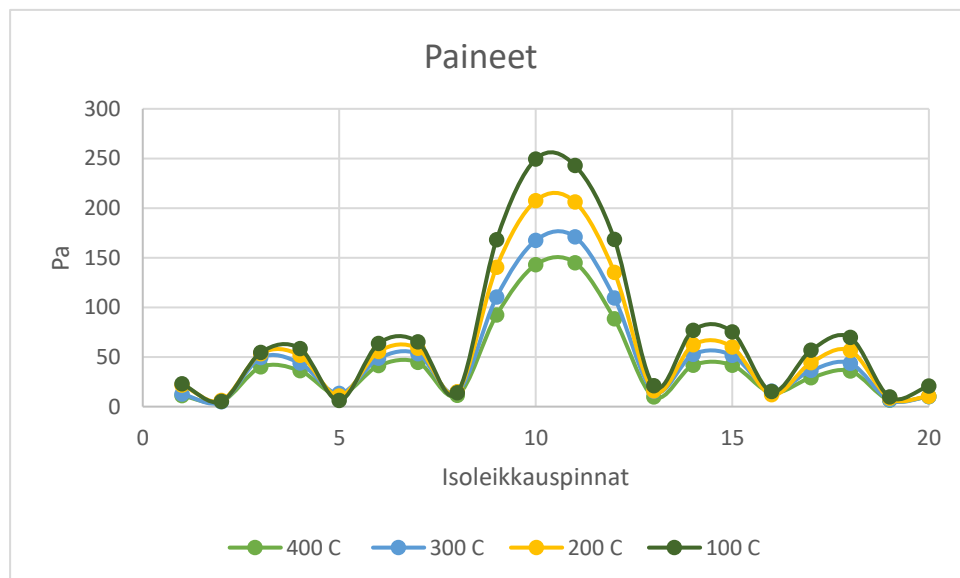
Kuviossa 10 on esitetty simulaatioiden tuottamat lämmönsiirtokertoimet isoleikkauspintojen funktiona eri lämpötiloille. Etäisyys kartonkiin oli 10 mm, puhallusnopeus 50 m/s ja lämmönsiirtokertoimet laskettiin 360 mm leveydeltä tulosten luotettavuuden parantamiseksi.



Kuvio 10. Lämmönsiirtokertoimet isoleikkauspintojen funktiona.

100 °C lämpötilan simulaatiossa lämmönsiirtokertoimet olivat hieman korkeammat verrattuna muiden simulaatioiden tuloksiin, ja lämmönsiirtokertoimien keskiarvoksi saatiin 194,80 W/m²K. Alkuperäisellä 200 °C lämpötilalla lämmönsiirtokertoimien keskiarvoksi saatiin 178,57 W/m²K ja 300 °C lämpötilalla lämmönsiirtokertoimien keskiarvo oli 162,66 W/m²K. Korkeimman lämpötilan simulaatiossa lämmönsiirtokertoimet olivat selkeästi alhaisemmat muiden simulointien tuloksiin verrattuna ja lämmönsiirtokertoimien keskiarvo oli noin 151,40 W/m²K.

Kuviossa 11 on esitetty paineet isoleikkauspintojen funktiona. 100 °C lämpötilalla suutinpaine oli korkein, noin 1484 Pa. Korkeimmalla lämpötilalla suutinpaine jäi matalimmaksi, jolloin se oli noin 808 Pa.



Kuvio 11. Paineet isoleikkauspintojen funktiona.

Taulukossa 6 on esitetty kootusti kaikkia eri lämpötiloja vastaavat suutinpaineet sekä lämmönsiirtokertoimien keskiarvot. Simulaatioissa vain suuttimelle syötettävän ilman lämpötilaa muutettiin ja muut määritetyt arvot pidettiin täysin samoina kuin kaikissa aiemmissa CFD-simulaatioissa. Lämpötilan nostaminen vaikutti siis laskevasti sekä suutinpaineeseen, että lämmönsiirtokertoimiin.

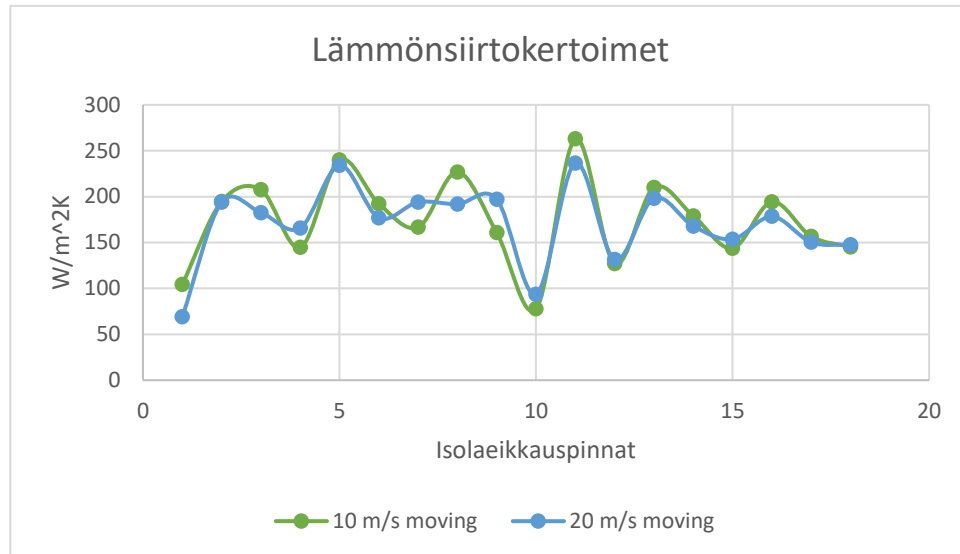
Taulukko 6. Lämpötilanmuutosten vaikutus suutinpaineeseen sekä lämmönsiirtokertoimiin.

Lämpötila (°C)	Lämmönsiirtokertoimien keskiarvo (360 mm leveys) (W/m ² K)	Suutinpaine (Pa)
100	194,8	1484
200	178,6	1207
300	162,7	958
400	151,4	808

6.7 CFD-simulaatio Puhalluskuivaussuutin 4.0 - liikkuva tilanne

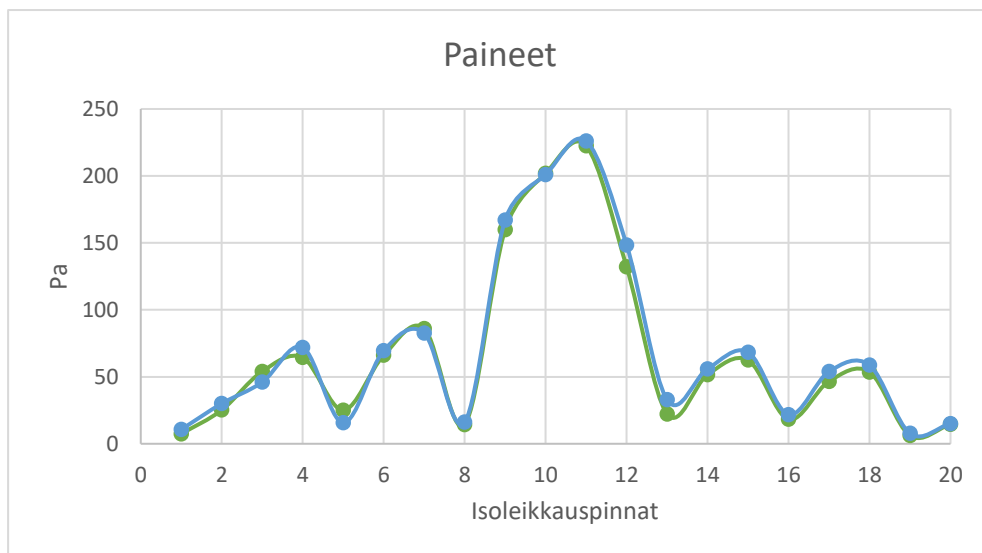
Staattisten tilanteiden lisäksi simuloitiin vielä tilannetta, jossa kartonkirata liikkui 10 m/s sekä 20 m/s. Etäisyys kartongin ja suuttimen pinnan välillä oli 10 mm ja suuttimelle syötettävän ilman lämpötila 200 °C. Simulaatio vastasi siis muuten ehdoiltaan alkuperäisten yhdeksän mittauspisteen simulaatioita, vain kartonki asetettiin liikkumaan.

Kuviossa 12 on esitetty liikkuvan kartongin CFD-simulaatioiden tuloksista kootut lämmönsiirtokertoimet isoleikkauspintojen funktiona. Lämmönsiirtokertoimien keskiarvo 360 mm leveydeltä kartongin liikkuessa 10 m/s oli lähes samana kuin staattisessa tilanteessa, 174,1 W/m²K. Kartongin liikkuessa 20 m/s lämmönsiirtokertoimien keskiarvoksi saatiin 170,1 W/m²K. Kummallakaan nopeudella tulokset eivät eroa merkittävästi staattisen tilanteen simuloinneista. Kartongin liikkuessa lämmönsiirtokertoimet eivät muodosta symmetristä kuviota, vaan radan liike aiheuttaa niiden heittelyn.



Kuvio 12. Lämmönsiirtokertoimet isoleikkauspintojen funktiona, liikkuva tilanne 10 m/s.

Kuviossa 13 on esitetty suutinpaineet isoleikkauspintojen funktiona. 10 m/s liikkuvan kartongin suutinpaine vastasi staattisen tilanteen suutinpainetta ja oli 1209,8 Pa. 20 m/s liikkuvan kartongin suutinpaineiden keskiarvoksi saatiin 1211 Pa. Suutinpaineet muodostavat yhtenevän kuvion kummallakin nopeudella ja vastaavat staattisen tilanteen suutinpaineita.



Kuvio 13. Suutinpaineet isoleikkauspintojen funktiona.

7 YHTEENVETO

CFD-simulaation ja Alfasimulaattoritestien tulokset ovat yhteneviä. Alfasimulaattorissa puhallusnopeus asetettiin sisääntulopaineen avulla ja CFD-simulaatiossa massavirran avulla, joten tämä aiheuttaa pieniä eroja tuloksissa. Alfasimulaattoriin asetettavaa painetta ei saa pidettyä täysin tasaisena, joten se saattaa myös hieman vaihdella mittauspisteiden välillä.

Alfasimulaattorissa etäisyys suutinpinnan ja mitattavan levyn välillä asetetaan ja mitataan käsin, jolloin se ei välttämättä ole täysin tarkka, toisin kuin CFD-simulaatiossa etäisyyden kartonkiin saa asetettua täysin tarkasti. Lisäksi CFD-simulaatiossa ulostulon paineen saa säädettyä tarkasti ja simulaatioissa käytettiin 0 Pa painetta, mutta Alfasimulaattorissa ulostulon painetta ei pysty säätämään ollenkaan. Ulostulon paine on tuloksista päätellen kasvanut mittausten kesken aiheuttaen sisään- ja ulostulon paine-erojen pienenemistä. Tämä näkyy etenkin 60 m/s puhallusnopeuden mittaustuloksissa, joissa lämmönsiirtokertoimet alkavat laskea Alfasimulaattoritestien tuloksissa. CFD-simulaation tulokset vastaavasti kasvavat vielä tässä vaiheessa.

Alfasimulaattorissa alumiinipalkit siirtävät toisiinsa lämpöä, mikä aiheuttaa lämmönsiirtokertoimien vääristymistä. Ensimmäisten palkkien lämmönsiirtokertoimet ovat huomattavasti korkeampia jokaisessa mittauspisteessä verrattuna viimeisten palkkien lämmönsiirtokertoimiin. Lämmönsiirtokertoimien pitäisi olla huomattavasti matalammat suuttimen keskiosaan verrattuna kummassakin reunassa, mutta tuloksissa vain toisessa reunassa tämä on nähtävissä. Voidaan siis olettaa palkkien siirtävän lämpöä toisiinsa ja vaikuttavan lämmönsiirtokertoimiin vääristävästi. Alfasimulaattorimittauksissa suuttimet myös asennetaan käsin kiinni itse simulaattoriin ja asennuksessa on voinut tapahtua pientä epävakautta, jolloin suuttimet eivät ole täysin suorassa. Pienikin vinouma vaikuttaa tuloksiin vääristävästi ja vinouma voi selittää myös osaltaan epäsymmetrisiä tuloksia lämmönsiirtokertoimissa. CFD-simulaatiossa tällaisia ongelmia ei ole.

CFD-simulaatiossa ongelmaksi muodostui verkotuksen sekä laskennan suorittaminen. Kumpikin työvaihe vaatisi erillisen laskentakoneen, jossa tehot riittäisivät tarpeeksi kireään verkon tekemiseen ja sen laskemiseen. Tällaista laskentakonetta ei kuitenkaan ollut käytettävissä, joten verkotus jouduttiin tekemään niin sanotusti löysemmäksi, mikä vaikuttaa tuloksiin.

CFD-teorian mukaan laskentaelementtien koko pitää määrittää Reynoldsin luvun perusteella. Laskentaelementtien koolle on määritetty raja-arvo turbulentsissa virtauksessa. Raja-arvoa kuvaa virtauskentän Y^+ -arvo. Y^+ varmistaa, että kiinteällä pinnalla on tarpeeksi pieniä elementtejä, jotta virtauksen muuttuminen laminaarisesta turbulentsiseksi voidaan kuvata Fluentin omilla virtausfunktioilla. Lämmönsiirrossa Y^+ pitäisi olla ≤ 1 , jotta Fluent pystyy laskemaan virtauskentän oikein ja sen perusteella lämmönsiirtokertoimen. Puhallusnopeudella 40 m/s ensimmäisen elementin koko pitäisi olla 0,0131, puhallusnopeudella 50 m/s ensimmäisen elementin koko pitäisi olla 0,0107 ja puhallusnopeudella 60 m/s 0,0090. Työn aikana CFD-laskennassa käytettiin kokoa 0,01 mm koneen laskentakapasiteetin vuoksi, joten tässä on syntynyt periaatteellinen virhe.

Mahdollisista virhelähteistä huolimatta CFD-simulaation tulokset ovat yhteneväisiä Alfasimulaattorikokeiden tulosten kanssa. Lisäksi simulaatiot, joissa kartonki liikkui, vastasivat staattisen tilanteen simulointeja. CFD-simulaatioissa luotua työnkulkua sekä siitä saatuja tuloksia voidaan siis pitää luotettavina Valmetin erilaisten suutinten optimoinnissa.

LÄHTEET

Incropera, F. & DeWitt, D. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New York: John Wiley & Sons.

KnowPap 22.0. Paperinvalmistuksen oppimisympäristö. Viitattu 11.11.2021.
http://www.knowpap.com/extranet/suomi/knowpap_system/user_interfaces/knowpap.htm

Martin, H.; Spalding, D.; Whitaker, S. & Winter, H. 1977. Advances in Heat Transfer. New York: Academic Press.

Valmet 2021. Valmetin sisäinen tietokanta.

Valmet 2021a. Valmet lyhyesti. Viitattu 23.09.2021. <https://www.valmet.com/fi/valmet-yrityksena/valmet-lyhyesti/>

Valmet 2021b. Kestävä kehitys. Viitattu 27.09.2021. <https://www.valmet.com/fi/kestava-kehitys/kestava-kehitys-valmetissa/>

Valmet 2021c. Coating Drying. Viitattu 24.10.2021. <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/coating/coating-drying>

Valmet 2021d. Air Dryers. Viitattu 24.10.2021. <https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/coating-drying/air-dryers/>

Valmet 2021e. Web Turning Air Dryers. Viitattu 24.10.2021.
<https://www.valmet.com/board-and-paper/board-and-paper-machines/coating-drying/web-turning--air-dryers>

Valmet 2021f. Replace IR drying with OptiDry Coat to reduce energy consumption. Viitattu 25.10.2021. <https://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/new-technology/FPOptiDryCoatHI/>