



NUMEERINEN VIRTAUSTUTKIMUS ILMAKUIVAINTEN SUUTTMIEN LÄM- MÖNSIIRROSTA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2022

Miko Rintala

Tarkastajat: Professori Jussi Sopenen

Professori Teemu Turunen-Saaresti

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Miko Rintala

Numeerinen virtaustutkimus ilmakeivainten suuttimien lämmönsiirrosta

Konetekniikan diplomityö

2022

71 sivua, 38 kuvaa, 6 taulukkoa ja 19 kaavaa

Tarkastajat: Professori Jussi Sopenen ja Professori Teemu Turunen-Saaresti

Avainsanat: paperikone, kartonkikone, päällystysosa, ilmakeivaus, ilmakeivain, haihdutus, lämmönsiirto, puhallussuutin

Diplomityössä tutkitaan, kuinka hyvin numeerinen virtauslaskenta (CFD) soveltuu ilmakeivainten puhallussuuttimien tutkimiseen, ja kuinka reikägeometria, massavirta, puhallusnopeus ja ratanopeus vaikuttavat niiden lämmönsiirtoon.

Tutkimusmetodeina käytetään alan kirjallisuudesta löytyviä teorioita ja numeerista virtauslaskentaa. Numeerisia tuloksia verrataan analyttisiin ratkaisuihin ja aiemmin toteutettuihin kokeellisiin tutkimustuloksiin.

Numeerisen ratkaisun tuloksista voidaan todeta, että menetelmä soveltuu puhallussuutinten lämmönsiirron ja virtausten tutkimiseen, sillä ne vastasivat analyttisen ratkaisun ja kokeellisen menetelmän tuloksia riittäväällä tarkkuudella. Numeerista laskentaa voidaan pitää luotettavana. Tutkimus kokeellisin menetelmin vie paljon aikaa, sillä ensin täytyy määrittellä geometria, jonka perusteella suunnitellaan ja valmistetaan koesuutin, jota tutkitaan koelaitteistolla. Numeerinen virtauslaskenta mahdollistaa saman geometrian tuomisen virtauslaskentaohjelmaan, jossa voidaan asettaa tämän tutkimuksen perusteella malliparametrit, niin laskentahilassa kuin ratkaisijaohjelmassa, ja saada vertailukelpoisia tuloksia lyhyessä ajassa. Uuden geometrian perusteella luotu uusi laskentahila voidaan korvata ohjelmassa nopeasti säilyttäen aikaisemmat laskenta-asetukset. Diplomityössä käytetty laskentarutiini mahdollistaa uusien ja käytössä olevien suutindiratkaisujen nopean tutkimisen ja optimoinnin. Tutkimuksen merkittävin tulos on se, että ratanopeus vaikuttaa puhallussuuttimien lämmönsiirtoon oletettua vähemmän.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Miko Rintala

Computational fluid dynamics study of air dryer nozzle heat transfer

Master's thesis

2022

71 pages, 38 figures, 6 tables and 19 formulas

Examiners: Professor Jussi Sopanen and Professor Teemu Turunen-Saaresti

Keywords: paper machine, board machine, coating section, air drying, air dryer, evaporation, heat transfer, blowing nozzle

The thesis studies how suitable computational flow dynamics calculation (CFD) is for studying the blowing nozzles of air dryers, and how the effects of hole geometry, mass flow, blowing velocity and web speed are reflected in their heat transfer.

The research methods in use are literature review of the subject and numerical flow calculation, and the results of numerical calculations are compared with analytical solutions found in literature and the results of a previous experimental research.

From the results of the numerical solution, it can be concluded that the method is suitable for studying the heat transfer and fluid flows of blowing nozzles, because the results are in par with results of the analytical solution and the experimental method with sufficient accuracy. Also, the results are reliable when comparing them mutually. Research using experimental methods is more time consuming than computational flow dynamics calculations because the geometry must be defined first, based on which the test nozzle is manufactured, which then must be studied separately in an experimental research apparatus. Numerical flow calculation enables the same geometry to be imported into the flow calculation software, where model parameters can be set based on this research, both in the computational mesh, and in the solver program and obtain comparable results in a relatively short time. A new computational mesh created based on the new geometry can be quickly replaced in the program, keeping the previous calculation settings. The calculation routine used in the thesis enables fast study and optimization of new and existing nozzles. The most significant result of the study is that the web speed has lower impact on the heat transfer coefficient than previously assumed.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	[m ²]
D	halkaisija	[m]
H	puhallusetäisyys	[m]
k	lämmönjohtavuus	[W/(m·K)]
L	paksuus	[m]
\dot{m}	massavirta	[kg/s]
p	paine	[bar, Pa]
Q	tilavuusvirta	[m ³ /s]
q	lämpövuoto	[W/m ²]
R	ainekohtainen kaasuvakio	[J/(mol·K)]
r	säde	[m]
s	ainevahvuus	[m]
T	lämpötila	[°C, K]
V	tilavuus	[m ³]
v	virtausnopeus	[m/s]

Kreikkalaiset

α	lämmönsiirtokerroin	[W/(m ² ·K)]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
τ	leikkausjännitys	[N/m ²]

ν	kinemaattinen viskositeetti	$[\text{m}^2/\text{s}]$
-------	-----------------------------	-------------------------

Vakiot

σ	Stefanin-Boltzmannin vakio	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
----------	----------------------------	--

Dimensiottomat luvut

ε	emissiivisyys, kuroumakerroin
---------------	-------------------------------

M	Machin luku
-----	-------------

Nu	Nusseltin luku
------	----------------

Pr	Prandtin luku
------	---------------

Re	Reynoldsin luku
------	-----------------

Sc	Schmidtin luku
------	----------------

Sh	Sherwoodin luku
------	-----------------

u^+	seinämänopeus
-------	---------------

y^+	seinämätäisyys
-------	----------------

Lyhenteet

CFD	Computational fluid dynamics
-----	------------------------------

DNS	Direct numerical simulation
-----	-----------------------------

LES	Large eddy simulation
-----	-----------------------

RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes
------	---------------------------------

RMS	Reynolds stress model
-----	-----------------------

RNG Re-normalisation group

SNR Single round nozzle

SST Shear stress transport

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

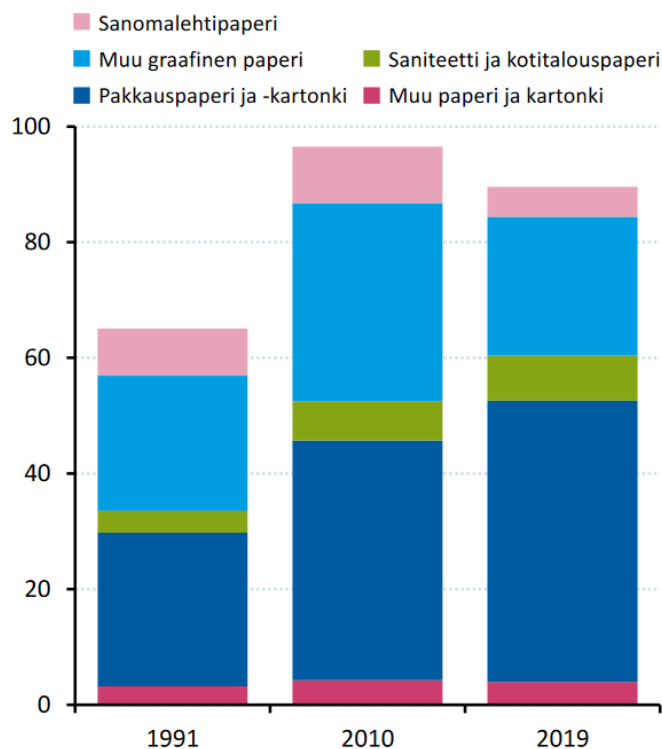
Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Tutkimuksen tausta	9
1.2	Tutkimuksen merkitys.....	17
1.3	Tutkimusongelma.....	19
1.4	Tutkimusmenetelmät	20
1.5	Rajaukset ja tavoitteet	21
2	Sovellettu lämmönsiirron laskennan analyyttinen ja numeerinen teoria.....	22
2.1	Lämmönsiirtomekanismit	22
2.2	Päällystetyn paperin ja kartongin lämmön- ja massansiirto.....	24
2.3	Puhallussuuttimet	27
2.4	Virtauslaskenta	31
2.4.1	Konvergenssi	31
2.4.2	Turbulenttisen virtauksen mallinnus.....	32
3	Suutinten virtaussimulointi.....	36
3.1	Koejärjestelyt	36
3.1.1	Laskentageometrian luonti.....	37
3.1.2	Laskentahilan luonti.....	39
3.1.3	Ratkaisuasetukset.....	40
4	Tulokset ja niiden analysointi.....	44
4.1	Laskenta-asetusten verifiointi	44
4.2	Virtauksen kuristuma ja lämpösäteily	49
4.3	Suutinsimuloinnit	53
4.4	Suuttimen reikien variointi.....	66
5	Yhteenveto ja johtopäätökset	68
	Lähteet	70

1 Johdanto

Tarkastellessa kahta viimeisintä vuosikymmentä, voidaan todeta, että paperi- ja kartonkilajien kokonaistuotantomäärät ovat laskeneet vähitellen, mutta tuotantolajien keskinäinen tuotantomäärien suhde on muuttunut. Kuvasta 1 nähdään, että eniten ovat kasvaneet pakkauspaperin- ja kartongin osuudet paperiteollisuuden kokonaistuotannossa. Graafisen paperin ja sanomalehtipaperin tuotannon vähenemistä selittää sähköisiin medioihin ja dokumentointi- ja arkistointitapoihin siirtymisen aiheuttama kysynnän lasku, kun taas pakkauspaperin- ja kartongin kasvutrendiä selittää elintarvikepakkausten käytön ja etämyynnin lisääntyminen. (Etila 2021, 15.)



Kuva 1. Paperiteollisuuden tuotanto Euroopassa vuosikymmenittäin (Etila 2021, 14)

1.1 Tutkimuksen tausta

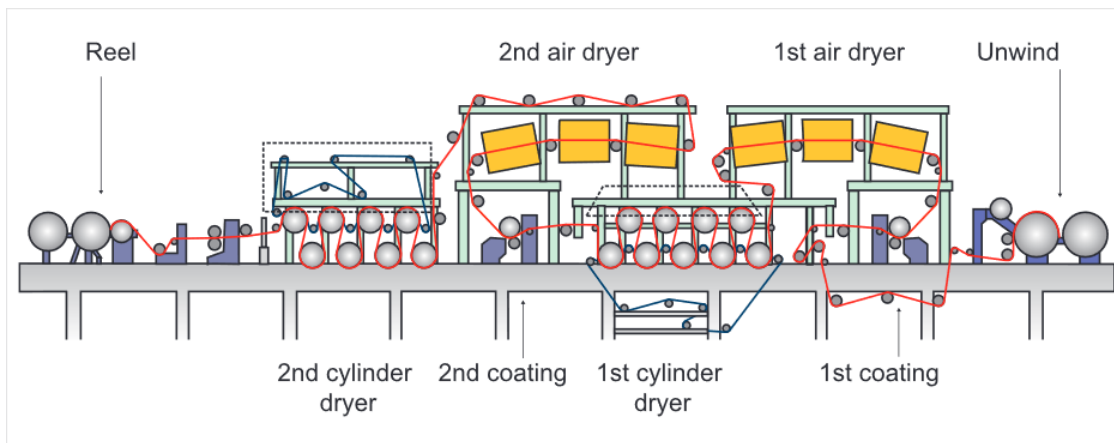
Paperin ja kartongin pintaliimauksella ja pigmenttipäällystyksellä voidaan saavuttaa perusmateriaalin ominaisuuksista poikkeavia lisäominaisuuksia, kuten korkeampi pinalujuus, painomusteen vähäisempi imeytyminen, kiiltävyyden ja läpikuultavuuden kasvu, tosin kunkin jäykkyyden ja lujuuden kustannuksilla (Paltakari 2009, 13).

Päällysteen laatu ja koneen ajettavuus ovat päällystetyn paperin ja kartongin valmistuksen kannalta tärkeitä seikkoja, sillä riittämätön laatu voi johtaa reklamaatioihin ja korvausvaatimuksiin loppuasiakkailta. Laatu ja ajettavuus ovat kytköksissä siten, että huono päällysteen laatu vaikuttaa negatiivisesti ajettavuuteen, ja huono ajettavuus aiheuttaa ratakatkoja ja mahdollisia laatuongelmia radan hallitsemattoman lepatuksen vuoksi. Näin ollen päällystysprosessin onnistuminen saumattomasti ilman tuotannon pysäyttäviä ratakatkoja ei ole vain kustannustehokasta, mutta myös tärkeä ominaisuus kilpailevalla paperin ja kartongin valmistusalalla. (Paltakari 2009, 23.)

Pintaliimaus tapahtuu tyypillisesti filmiliimapuristimessa paperikoneen kuivatusosalla etuja jälkikuivatusryhmien välillä, jolloin kuiva-ainepitoisuus on luokkaa 86 %–89 %. Pintaliimaus lisää tuotteen kosteuspitoisuutta, jolloin jälkikuivaus vaaditaan ennen rullausta tai päällystämistä. Kuivatus voidaan suorittaa kosketuksettomasti pilaamatta liimapintaa konvektio- tai infrapunakuivauksella. Pintaliimausprosessissa paperi- tai kartonkiradalle levitetään liima-aineseos, joka koostuu tyypillisesti polymeeriaineista, kuten esimerkiksi tärkistä tai karboksimeytyyliselluloosasta. Tämä seos parantaa paperin tai kartongin pinalujuutta, vähentää pinnan huokoisuutta ja parantaa jäykkyyttä. Nämä ominaisuudet antavat hyvät edellytykset tuotteen myöhemmälle päällystämiselle. (Paltakari 2009, 18.)

Paperi- ja kartonkikoneiden päällystysosalla rata kulkeutuu päällystysasemien lävitse, joissa päällystepasta levitetään ja kuivataan haihduttamalla siitä vettä halutun loppukosteuden saavuttamiseksi. Päällystysosa voi olla osana paperi- tai kartonkikonetta, jolloin prosessia nimitetään on-machine päällystykseksi, kun taas koneesta irrallista päällystystä nimitetään off-machine päällystykseksi (kuva 2). Tyypillinen päällystekerros on paksuudeltaan noin 7 mikrometriä ja neliöpaino noin 10 g/m². (Ek & Gellerstedt & Henriksson 2009, 342.)

Päällystysprosessi voidaan jakaa eri vaiheisiin, jotka ovat päällystepastan applikointi eli levittäminen, päällysteen määrän säätely, päällysteen kuivaus ja kuivuneiden päällystekerrosten viimeistely kalanterien avulla (Paltakari 2009, 19).



Kuva 2. Off-machine päällystyskone (Paltakari 2009, 20)

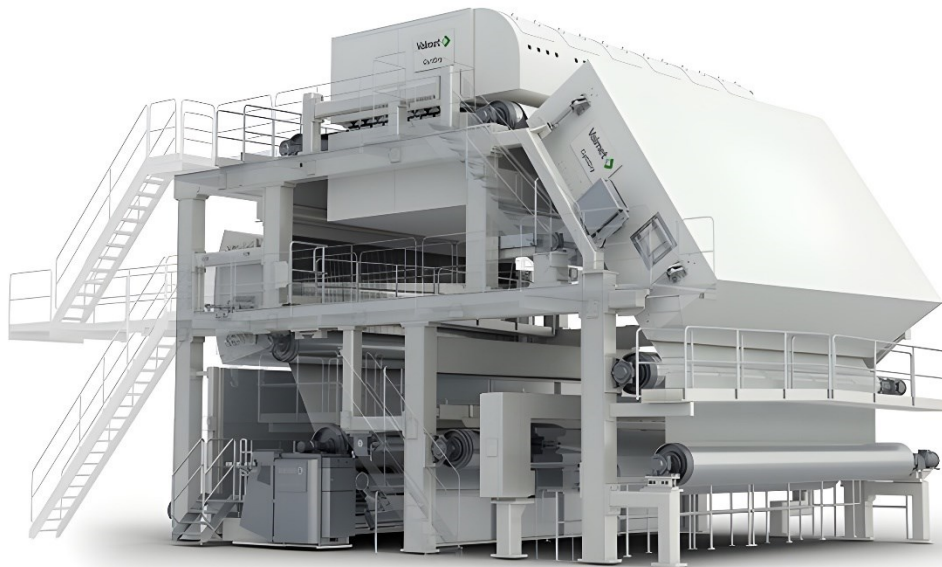
Paperin ja kartongin päällystys perustuu kahteen eri periaatteeseen, joissa ensimmäisessä radalle levitetään reilusti päällystettä ja jälkikäteen sen määrä säädetään erilaisilla terillä tasottamalla niin, että saavutetaan haluttu päällysteen neliöpaino. Toisessa periaatteessa käytetään jo valmiiksi tarkasti annosteltua päällysteen määrää, joka levitetään tuotteen pinnalle. (Ek et al. 2009, 354.)

Pintaliimauksessa ja päällystämässä paperia tai kartonkia kuivataan ensin kosketuksettomilla infrapuna- tai ilmakeivaimilla, sillä veden ja päällysteen seos tekee tuotteesta tahmeaa, eikä se voi näin ollen olla kosketuksissa tukitelojen eikä kuivatussylinderin kanssa sellaisenaan. Kuivatussylinderikuivaus on tämän seikan takia prosessijärjestyksessä viimeinen kuivausmetodi, mutta järjestelyjä, joissa päällystyskuivaus toteutetaan pelkästään konvektiokuivaimilla, on myös olemassa. (Ek et al. 2009, 365.)

Infrapunakuivaimien toimintaperiaate perustuu energian siirtymiseen lämpösäteilyn muodossa kuivaimesta paperi- tai kartonkirataan. Infrapunakuivaimien toiminta perustuu joko sähköllä tuotettuun lämpösäteilyyn, jossa kvartsiputkien sisällä olevien volframilankojen resistanssi kuumentaa niitä lämpötiloihin 1900–2500 °C tuottaen säteilylähteen, jonka aallonpituus on 0,8–2 µm, kun taas kaasulla toimivissa infrapunakuivaimissa kaasulla tuotettu

liekki lämmittää rei'itettyä keraamista tai metallista pintaa lämpötiloihin 850–1050 °C, jolloin se säteilee lämpöä 1,5–2 µm aallonpituudella. Infrapunakuivaimia käytetään tyypillisesti päällystysasemien ensimmäisinä kuivaimina, sillä ne mahdollistavat nopean radan lämpötilan nousun, jolloin kostea päällystyspasta jähmettyy ja kosketus tukiteloihin ja kuivatussylintereihin on mahdollista. (Heikkilä & Rajala 2009, 560–563.)

Ilmakuivaimet (kuva 3) perustuvat konvektiokuivaukseen ja ne ovat rakenteeltaan sellaisia, että paperi- tai kartonkirata kulkee niiden lävitse ilmatyynyn kannattelemana tapauksissa, joissa kyseessä on kaksipuoleinen leijutuskuivain, tai vaihtoehtoisesti tukitelojen kannattelemana yksipuoleisissa kuivaimissa. Kaksipuoleisia kuivaimia käytetään, kun radan molemmat puolet päällystetään, eikä se näin ollen voi olla kosketuksissa tukiteloihin. Puhallus syntyy ilman purkautuessa kuivaimen puhallussuuttimista radan pintaan korkealla ilman nopeudella, joka kasvaa lämpötilan noustessa johtuen ilman tiheyden pienentymisestä. Puhalluksen lämpötila ja nopeus ovatkin ne parametrit, joilla ilmakuivainten kuivatusprosessia voidaan hallita. Ilma lämmitetään joko höyryllä, kaasulla tai sähköllä. (Ek et al. 2009, 365.)

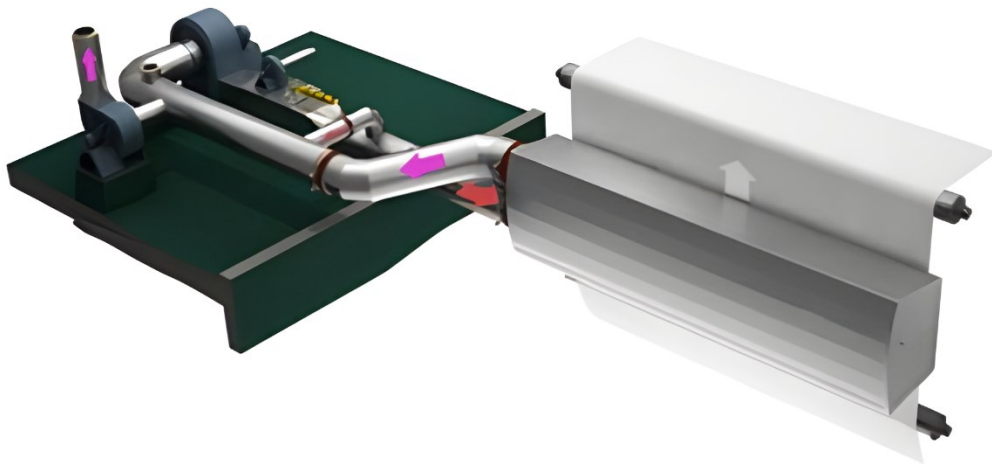


Kuva 3. Päällystysasema, jossa Valmetin OptiDry-ilmakuivaimia (Valmet 2012)

Ilmakuivainten ilmajärjestelmät koostuvat tyypillisesti kiertoilmapuhaltimesta, poistoilmapuhaltimesta ja tapauksissa, joissa ilma lämmitetään kaasupolttimien avulla, myös

palamisilmapuhaltimesta. Lisäksi järjestelmä on myös varustettu joko matalapainehöyrypat-
terilla, kaasupolttimella tai sähkövastuksella, ilman mitoituslämpötilan aikaansaamiseksi.
Järjestelmän komponentit ovat kytketty toisiinsa ilmankanavien välityksellä. (Mujumdar
2015, 922.)

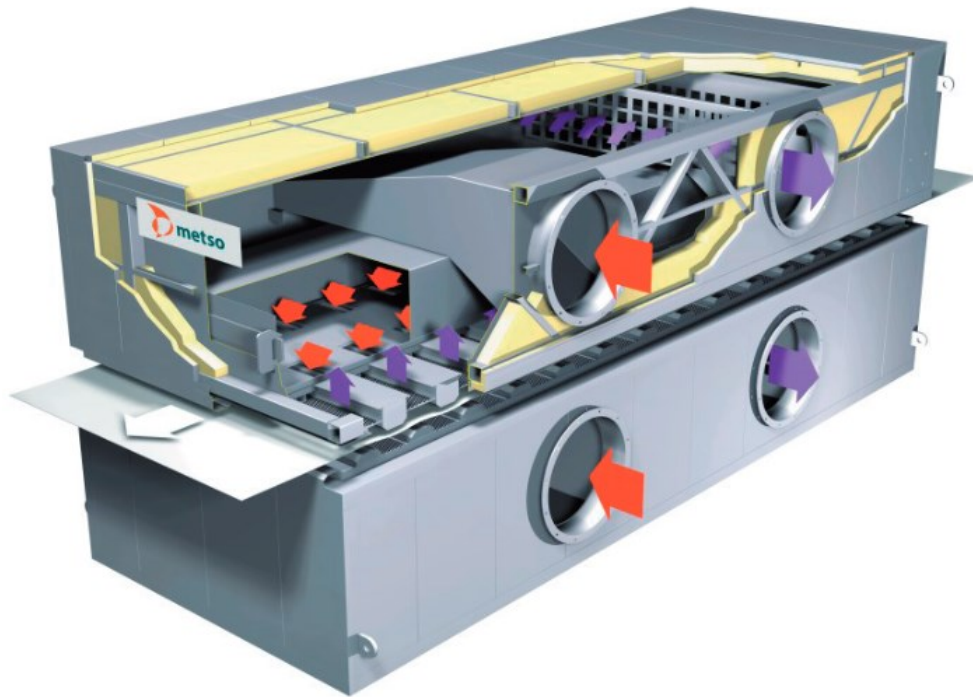
Kierrosta poistettavan ilman osuus on luokkaa 10–20 %, jolloin vastaava ilmamäärä ja
kuivaimen vuotoilmamäärä korvataan tuoreella ilmalla, joka voidaan ottaa suoraa kiertoon
(kuva 4) tai ohjata osittain kaasupolttimien palamisilmaksi kaasulla toimivissa ilmakeivai-
missa. Tavoitellessa mahdollisimman energiatehokasta järjestelmää, voidaan se myös varus-
taa lämmönvaihtimella, jolla palamis- tai korvausilmaa voidaan esilämmittää. Lämpö ote-
taan talteen ohjaamalla muuten hukkaan menevä kuuma poistoilma vaihtimen putkien läpi,
ja palamis- tai korvausilma puhalletaan tai imetään putkien välistä, jolloin lämpö putkista
siirtyy siihen. (Heikkilä et al. 2009, 569.)



Kuva 4. Korkean intensiteetin ilmakeivain ja sen ulkoiset ilmajärjestelmät (Valmet 2012, 10)

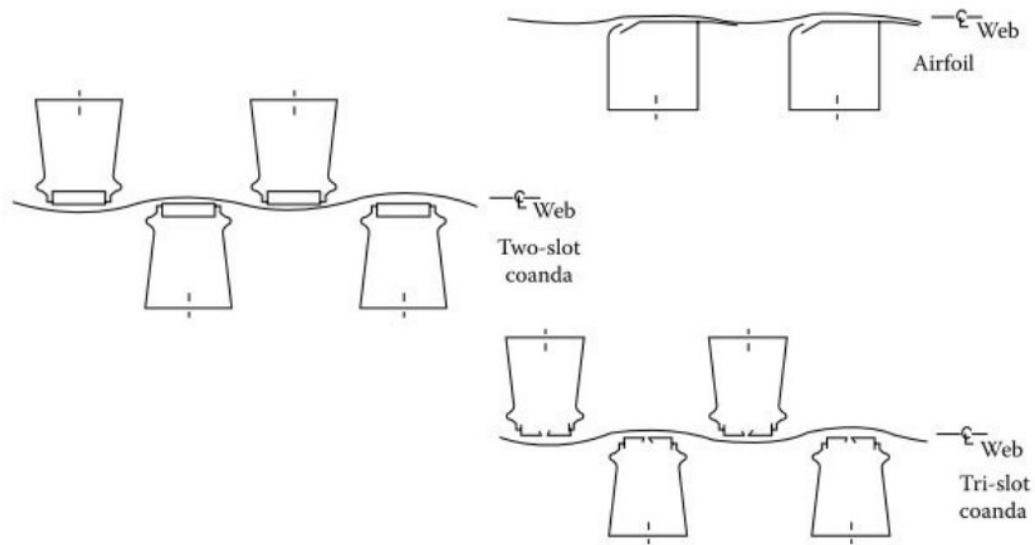
Ilma johdetaan kuivaimiin niiden päädyssä olevan ilmayhteen kautta, ja siitä edelleen sisäi-
siä kanavia pitkin suuttimille asti. Kuvassa 5 näkyvä monivaiheinen sisäinen ilmanjakoka-
navisto mahdollistaa tasaisen ilmavirran jakautumisen paperi- tai kartonkiradan poikittai-
sessa ja pitkittäisessä suunnassa. Sisäinen imuilman kanava myös mahdollistaa tehokkaan
ilman kierrättämisen, sillä puhallussuuttimien väliset imuritulat päästävät ilman takaisin

kiertoon, ja kuivaimen tulo- ja jättopuolen ja suuttimien päissä olevilla mekaanisilla reuna-
tiivistyksillä saadaan minimoitua vuodot kuivaimen ja radan välistä. (Heikkilä et al. 2009,
567.)



Kuva 5. Ilmakuivaimen sisäinen rakenne (Valmet 2022)

Kuvassa 6 näytetyt leijutuskuivainten perinteiset suuttimet perustuvat geometrioihin, joissa ilma puhalletaan radan suuntaisesti joko yhdestä radan suuntaisesta raosta (Foil-suutin), tai kahdesta raosta niin, että ilmavirrat ovat toisiaan vasten (Float-suutin). Yhden raon suuttimissa suuttimen pinnalle muodostuu negatiivinen ja positiivinen paine, kun taas kaksirakoisessa suuttimessa pinnalla vallitsee vain ylipaine. Ylipaine kumoo radan pystysuuntaista kireyttä auttaen radan kosketuksetonta kulkeutumista kuivaimen lävitse. Rakojen suunnittelussa tavoitteena ovat radan hallittavuus ja mahdollisimman korkea lämmönsiirto. (Mujumdar 2015, 921.)



Kuva 6. Leijutussuuttimia yksi- ja kaksipuoleisissa kuivaimissa yhdellä ja useammalla raolla (Mujumdar 2015, 922)

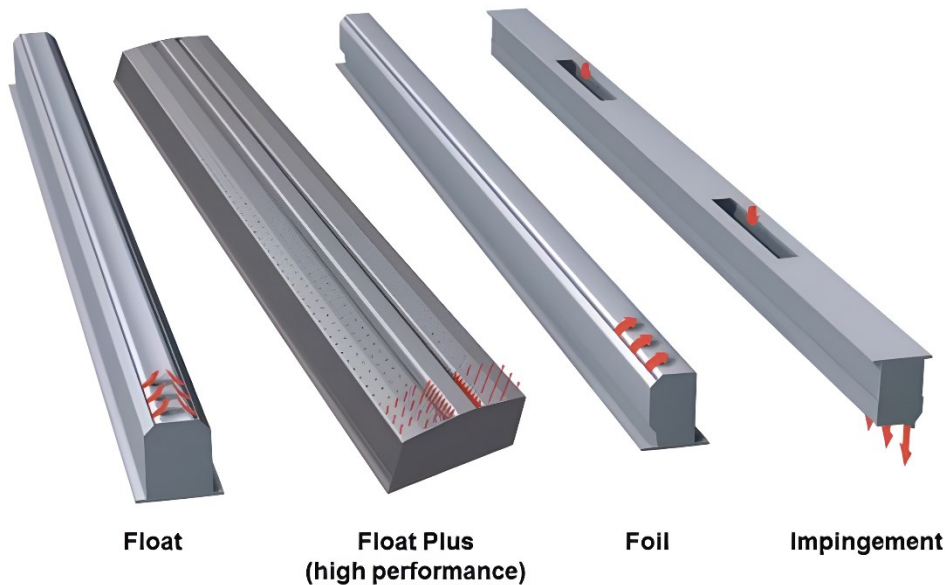
Paperin ja kartongin päällysteen kuivaaminen on kallista, sillä tehokas veden haihduttaminen päällysteestä on paljon energiaa vaativa prosessi. Vettä haihdutetaan 0.1–0.2 t jokaista tuotettua paperi- tai kartonkitonnia kohden, jolloin energiankulutus vaihtelee välillä 1,25–2,8 kWh kilogrammaa haihtunutta vettä kohden, riippuen kuivatusmenetelmistä ja prosessiparametreista. (Valmet 2012, 2.). Kuivatuksen käyntikustannukset koostuvatkin kuivatuksen energiankulutuksesta ja kuivatuksen energialähteiden materiaali- tai tuottokustannuksista. Energialähteinä käytetty matalapaineinen höyry tai sähkö voidaan tuottaa paikallisesti tehtaan yhteydessä olevalla voimalaitoksella, mutta maakaasu tai LPG-kaasu joudutaan tuomaan paikalle. Energialähteen valintaan vaikuttaa saatavuus, hinta, haluttu lämpötila ja investointikustannukset. Kaasulla ja sähköllä voidaan saavuttaa suurempia lämpötiloja kuin matalapaineisella höyryllä. (Valmet 2022.)

Ilmakuivainten energiatehokkuutta voidaan mitata siirrettynä energiana paperi- tai kartonkikaraan, kuivatuksen käytetyn energian suhteen. Ilmakuivainten energiatehokkuudet ovat tyypillisesti suuruusluokkaa 70 %–75 %, kun taas sähkölämmitteisillä infrapunakuivaimilla on se tyypillisesti vain luokkaa 25 %–35 %. Kun ilmakuivainten ilmajärjestelmiin lisätään lämmöntalteenottokeino, voidaan saavuttaa jopa 80 % energiatehokkuus. (Valmet 2012, 13.). Energiatehokkaimmilla kuivainratkaisuilla saavutetaan vähäisempi energiankulutus,

parempi lopputuotteen laatu, korkeampi prosessin hyötysuhde, pienemmät päästöt ja tuotantokoneen kokonaisvaltaisesti parempi rahallinen kannattavuus (Valmet 2022).

Perinteisissä leijutus-suuttimissa ilma johdetaan raoista tai rei'istä paperi- tai kartonkiradan pintaan sen suuntaisesti, kun taas päällepuhallussuuttimissa ilma johdetaan kohtisuoraan rataan nähdessä mahdollistaen tehokkaan lämmönsiirtomekanismin (Mujumdar 2015, 780). Aiemmat tutkimukset osoittavat, että päällepuhallussuuttimien korkean lämpötilan ja korkean puhallusnopeuden yhdistelmällä saavutetaan kuivatussylintereitä tehokkaampia kuivaustehoja ja lyhyempiä konegeometrioita. Puhalluslämpötilat vaihtelevat näissä päällepuhallussuuttimilla varustetuissa konvektiokuivaimissa välillä 150–540 °C ja tyypillisin käytetty lämpötila on 300 °C ja lämpö tuotetaan joko aiemmin mainituilla matalapaineisella höyryllä, kaasulla tai sähkövastuksilla. Puhallusnopeus muodostuu yksittäisen reiän tilavuusvirran ja reiän poikkipinta-alan suhteen, ja tyypillisimmät puhallusnopeudet päällepuhalluskuivaimissa ovat välillä 60–130 m/s. Päällepuhalluskuivaimen olennaisimpia suunnittelun parametreja ovat juuri puhalluslämpötila, suuttimen painehäviö ja puhallusnopeus, jonka funktiona muun muassa lämmönsiirtokerroin muodostuu. Suutinjärjestelyillä, geometrioilla, paluuilman imuaukkojen järjestelyillä ja niiden geometrioilla ja puhallusetäisyyksillä on vaikutus edellä mainittuihin parametreihin. (Mujumdar 2015, 780–782.)

Valmetin patentoidut PowerFloat-suuttimet (kuva 7) yhdistää molempien suutintyyppien tekniikkaa mahdollistaen entistäkin tehokkaamman haihdutuksen ja paremman radan hallinnan. PowerFloat-suutin ei vain paranna kuivaustehoa, vaan myös vähentää energiankulutusta, sillä tehokkaamman lämmönsiirron ansiosta myös paluuilman ja poistoilman lämpötila ovat pienemmät, jolloin energiaa hukataan vähemmän. (Valmet 2012, 3.)



Kuva 7. Tyypillisimmät Valmetin käyttämät suuttimet (Valmet 2012)

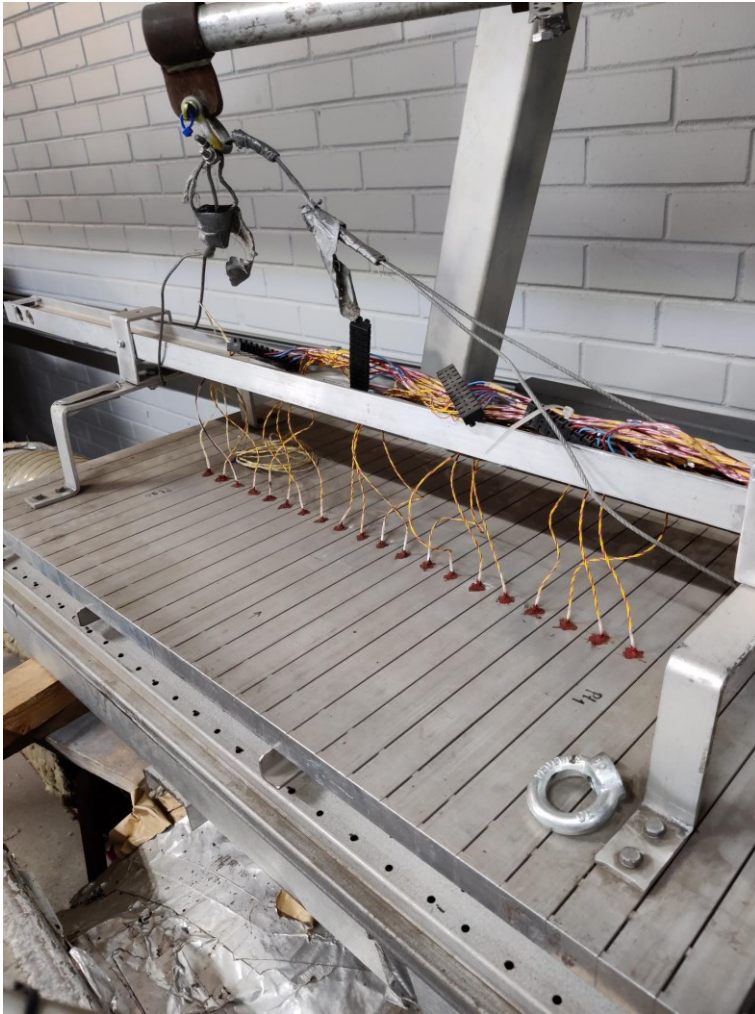
Aiemmat teoreettiset ja kokeelliset tutkimukset osoittavat, että kuivatessa korkean intensiteetin päällepuhalluskuivaimilla, päällystetyn paperin ja kartongin laatu on vähintään yhtä hyvä tai jopa parempi, kuin perinteisellä infrapunakuivaimella kuivattu tuote. Rajala et al. ovat tutkimuksessaan tarkastelleet infrapunakuivaimen korvaamista korkean intensiteetin päällepuhalluskuivaimella päällystysasemien ensimmäisenä kuivaimena. Tutkimuksessa on käytännön osuudessa valmistettu 1,31 m pitkä päällepuhalluskuivain koepäällystyskoneelle ja käytetty 300, 450 ja 500 °C puhalluslämpötiloja ja 20, 40 ja 60 m/s puhallusnopeuksia. Vertailtaessa koepaperikappaleiden tuloksia painomusteen imeytymisen, paperin pinnan tasaisuuden ja kiillon suhteen, huomattiin, että tulokset olivat laadultaan parempia kuin sähkökäyttöisen infrapunakuivaimen tuottamat vastaavat koekappaleet. (Rajala & Milosavljevic & Kiiskinen & Hendrickson 2004, 2528.)

Infrapunakuivaimien huonoina ominaisuuksina voidaan pitää korkeita käyttökustannuksia, etenkin sähkötoimisilla kuivaimilla, tulipalovaaroja ratakatoissa ja huoltokustannuksia. Sähköinfrapunakuivaimissa energiaa hukataan jopa 50 % lämpösäteilytehosta jäähdytysilmaan, ja kaasuinfrainoissa energiaa hukataan poistoilmaan, jolloin noin 28–55 % kaasun energiasta voidaan hyödyntää säteilyenergiaan. (Heikkilä et al. 564.)

1.2 Tutkimuksen merkitys

Lämmönsiirron tehostaminen ilmakeivaimissa nostaa haihdutustehoa ja parantaa energiatehokkuutta. Näin vähennetään paperin ja kartongin tuotantokustannuksia ja säästetään ympäristöä. Ilmakeivaimissa lämmön- ja massansiirto tapahtuu samanaikaisesti. Tehokas lämmönsiirto ilmapuhalluksilla tarkoittaa tehokasta kuivatusenergian siirtoa rataa ja samalla haihtuneen kosteuden kuljetusta pois radan pinnalta. Haihtunut vesi poistetaan ilmakeivaimista poistoilman mukana korkeassa lämpötilassa. Lämmön talteenotossa tarvittava korvausilma lämmitetään korkean energian poistoilmalla. Kontakti- ja säteilykuivatuksessa lämmönsiirto ja haihdutus ovat suurelta osin peräkkäisiä tapahtumia, jolloin haihtuneen veden lämpösiirtö on matala ja lämmön talteenoton tehokkuus alhainen. Hukkalämpöä ei voi käyttää samalla kuivaimella. Puhalluskuivauksen ominaisuudet mahdollistavat yrityksen markkinaosuuden säilyttämisen tai kasvattamisen alalla, jolla energiatehokkuus on tärkeä kilpailutekijä.

Yrityksen omista tutkimuksista suutingeometriaa on optimoitu lähinnä analyttisten kaavojen perusteella ja kokeellisin menetelmin valmistamalla koesuutin ja testaamalla sitä käytännössä. Kokeelliset testit on suoritettu Alfasimulaattori-nimisellä laitteella (kuva 8) Valmet Raisen koelaitoksella. Alfasimulaattorissa sähkövastuksilla lämmitetty ilma puhalletaan keskipakopuhaltimella koesuuttimiin, joista ilma purkautuu lämpötilamittareilla varustettuja alumiinipalkkeja vasten. Laitteessa voidaan varioida puhallusnopeutta, puhalluslämpötilaa ja puhallusetäisyyttä. Lämmönsiirtokerroin alumiinipalkkeittain voidaan laskea lämpenemisnopeuden avulla, ja sen jakautumista suuttimen leveysuunnassa voidaan kuvata usean vierekkäisen palkin kertoimen avulla. Alumiinipalkkien väliin on jätetty rako, jotta lämpö ei siirry palkista toiseen väärinä tuloksia.



Kuva 8. Alfasimulaattori

Viimeisimmissä tutkimuksissa on otettu käyttöön numeerinen virtauslaskenta eli CFD (Computational fluid dynamics), johon on luotu ja validoitu johdonmukainen työnkulku puhallussuutinten laskentaa varten. Suutingeometrian optimoinnissa ei toistaiseksi ole hyödynnetty CFD-laskentaa, joka mahdollistaa nopean ja kustannustehokkaan testausmenetelmän verrattuna kokeelliseen testaamiseen. Samalla geometrioiden testaukseen saadaan paljon lisäparametreja, kuten puhallusilman lämpötila ja vastapinnan nopeus. Virtauslaskennassa ei ole mukana lämpösäteilyn ja radasta haihtuvan kosteuden vaikutusta kokonaislämmönsiirtoon.

1.3 Tutkimusongelma

Tässä tutkimuksessa pyritään selvittämään, voidaanko CFD-laskennalla tutkia ilmakehävain-
ten puhallussuuttimien virtauksia, lämmön- ja massansiirtoa sekä painevaikutusta. Tutki-
muksessa pyritään vastaamaan tutkimusongelmasta johdettuihin tutkimuskysymyksiin:
"kuinka luotettavia tuloksia numeerinen virtauslaskenta tuottaa?", "kuinka reikägeometria
vaikuttaa virtauksen kuristumaan?" ja "kuinka ratanopeus vaikuttaa lämmönsiirtokerto-
imeen?".

Puhallussuuttimien jako on tärkeä suunnitteluparametri, sillä kostea ja jäähtynyt ilma tulee
poistaa suutinten ja radan välistä häiritsemättä vierekkäisten suutinten puhallusta. Tyypilli-
sesti poistoaukot sijaitsevat suutinten välissä, ja näin ollen suutinten jako voidaan määrittää
suutinten keskilinjojen suhteen, jolloin itse suuttimien on oltava kapeampia kuin niiden jaon
mitta. (Mujumdar 2015, 374.)

Suutingeometriat ovat tyypillisesti joko kohtisuoraan rataa rei'istä puhaltavia suorapintai-
sia päällepuhallussuuttimia tai kaareviksi muotoiltuja, pitkistä raoista tai yksittäisistä rei'istä
radan suuntaan, Coandă-pintoja pitkin puhaltavia leijutus-suuttimia tai näiden kahden edelle
mainitun yhdistelmiä. Leijutus-suuttimien puhallusprofiilit ovat luonteeltaan päällepuhallus-
suuttimien puhallusprofiileja tasaisempia ilman nopeuden suhteen, kun taas päällepuhallus-
suuttimien puhallusprofiili on turbulenttisempaa mahdollistaen tehokkaamman lämmönsiir-
ron. (Mujumdar 2015, 374.)

Puhallussuuttimien tehokkaampaa lämmönsiirtoa ei kuitenkaan voida kaikissa tapauksissa
parantaa leijutus-paineen kustannuksella, joten ratkaisujen täytyy olla sellaisia, että paperi-
tai kartonkiradan ajettavuus säilyy ja radan kontakti suuttimiin vältetään.

Ideaalitapauksessa päällepuhalluspinta-alaa on mahdollisimman paljon, suutinvälien ja lei-
jutuspintojen suhde sellainen, että poistoilman määrä on pieni. Tällöin rata saadaan asettu-
maan leijutusilman vaikutuksesta halutulle etäisyydelle kuivaimesta.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelminä toimii kirjallisuustutkimus ja numeerinen virtaustutkimus. Kirjallisuustutkimuksessa keskitytään materiaaleihin paperin ja kartongin päällystyksen kuivaamisesta, lämmönsiirrosta yleisesti ja lämmönsiirrosta kuivaimien puhalluslaitteissa, sekä virtauslaskennan teoriasta. Aineiston pohjalta pyritään muodostamaan riittävä kokonaiskuva edellä mainituilta aihealueilta tukemaan tutkimusongelman ratkaisua. Aikaisemmista ilma-kuivaimien lämmönsiirron tutkimuksista pyritään löytämään tunnistettuja ongelmia, jotta niille voidaan etsiä virtauslaskennalla ratkaisuja. Virtauslaskennan teoriaa tutkitaan niiltä osin, kun se on tämän tutkimuksen kannalta tarpeellista.

Numeerisessa virtaustutkimuksessa hyödynnetään jo aiemmassa, yrityksen sisäisessä tutkimuksessa kokeellisesti validoitua kaavamaisista virtauslaskennan työjärjestystä, ja se suoritetaan ANSYS Fluent -laskentaohjelmalla. Menetelmä soveltuu erinomaisesti erilaisten suutingeometrioiden tutkimiseen, sillä koesuutinta ei tarvitse suunnittelun pohjalta valmistaa ja tutkia kokeellisesti, vaan sama malli voidaan tuoda laskentaohjelmaan ja saada tuloksia muutamassa tunnissa. Lämmönsiirtoa ja leijutuspainetta voidaan analysoida myös eri puhalluslämpötiloilla ja ratanopeuksilla.

Tulokset taulukoidaan, verrataan keskenään ja niiden validiteettia arvioidaan vertaamalla tuloksia kirjallisuudesta löytyviin analyttisiin ratkaisuihin ja aiemmin toteutettujen suutinten kokeellisten tutkimusten tuloksiin. Lisäksi tuloksia verrataan yrityksen käytössä olevan DryMan-simulointiohjelman tuloksiin.

DryMan on Heikkilän (1993) väitöskirjassa esitetty, fysiikkaan ja empiirisiin tutkimustuloksiin perustuva, päällysteen kuivauksen laskentaan tarkoitettu simulointiohjelma, joka on validoitu koepäällystyskoneella ja tuotantokoneilla. Ohjelma perustuu tiettyihin teorioihin lämmön- ja massansiirrosta sekä rainan sisällä että rainan pinnoilla. Oleellista on tuntee lämmönsiirtokerroimet rainan pinnalla, jotta lämmön- ja massansiirto voidaan laskea. Rainan pinnalla lämmön- ja massansiirtokerroimen välillä on hyvin tunnettu suora yhteys, joten lämmönsiirtokerroin määrittää myös massansiirron tehokkuuden. Eri suuttimien lämmönsiirtokerroimet ovat laskennan tärkeimmät lähtöarvot. Väärin arvioitu lämmönsiirtokerroin vääristää kyseessä olevan kuivaimen ja kaikkien sen jälkeen tulevien kuivaimien kuivatuskapasiteetin.

Odotettuja konkreettisia tuloksia ovat valmiit mallit numeerista lämmön- ja massansiirtolaskentaa varten usealle eri suuttimelle, lämmönsiirtokertoimien- ja staattisten paineiden kuvaajat vastapinnan staattisissa tilanteissa sekä määrätyillä ratanopeuksilla ja -etäisyyksillä. Näiden lisäksi saadaan taulukoituja virtauksen kuroumakertoimia keskenään erilaisille reikägeometrioille.

1.5 Rajaukset ja tavoitteet

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutkia ilmakeivainten puhallussuuttimien lämmönsiirtoa CFD-laskennan avulla. Tarkoitus on parantaa nykyisiä analyyttisiä lämmönsiirtomalleja ja luoda CFD-pohjainen optimointityökalu suutinkemitykseen. Työssä tarkastellaan pakotettua konvektiivista lämmönsiirtoa puhallusilman ja sileän pinnan välillä. Työssä ei oteta huomioon radasta haihtuvan kosteuden vaikutusta eikä lämmönsiirtoa radassa. Näin menetellen saadaan suora vertailu nykyiseen kokeelliseen menetelmään.

Tutkimus rajataan koskemaan yrityksen käytössä jo olevia ilmakeivainten suuttimia. Tavoitteena tutkimuksessa on tutkia, kuinka hyvin CFD-laskentaa voidaan hyödyntää suutinten lämmön- ja massansiirto-ominaisuuksien kehittämisessä.

2 Sovellettu lämmönsiirron laskennan analyyttinen ja numeerinen teoria

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämmön siirtyminen tapahtuu aina kun jonkin systeemin sisällä ja kahden tai useamman systeemin erottavalla rajalla on lämpötilaeroa. Tällöin lämpötilaerot pyrkivät tasapainoon, ja siirto tapahtuu aina lämpimästä kylmään. Jos systeemiin tuodaan tai siitä poistetaan lämpöenergiaa, myös sen lämpötila muuttuu, kuitenkin olettaen, ettei välissä tapahdu faasimuutosta. Lämmönsiirtomekanismit jaetaan kolmeen muotoon, jotka ovat johtuminen, konvektio eli kuljetus ja lämpösäteily. Yleensä nämä eivät tapahdu yksittäisinä ilmiöinä, vaan kahden tai useamman muodon yhtäaikainen vaikutus on tyypillistä. (Venkateshan 2021, 2.)

2.1 Lämmönsiirtomekanismit

Johtuminen on kiinteän aineen tai fluidin sisäistä, ja kahden tai useamman keskenään kosketuksissa olevien aineiden välistä lämmön siirtymistä. Siirtyminen perustuu hiukkasten keskinäisiin vuorovaikutuksiin, jossa energiaa siirtyy korkeamman energian omaavilta hiukkasilta vähemmän energiaa omaaviin hiukkasiin. Aina kun on olemassa lämpötilagradientti, on tapahduttava lämmön johtumista alenevan lämpötilan suuntaan. Lämmön siirtymistä aikayksikköä kohden voidaan kuvata määräyhtälöillä. Fourierin lain avulla voidaan määrittää lämpövirran tiheys, eli lämpövuoto yksidimensionaaliselle tasolle. Yhtälö esitetään muodossa

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

jossa q''_x on lämpövuoto [W/m^2], k on lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] ja L on materiaalin paksuus [m] lämpövuovektorin suuntaan. Miinusmerkki kertoimen k edessä kuvastaa lämmön johtumista korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämmön määrä q_x [W] saadaan kertomalla lämpövuoto q''_x [W/m^2] poikki-pinta-alalla [m^2]. (Incropera & DeWitt, 1996, 3–4.)

Konvektio perustuu liikkeessä olevan fluidin kykyyn siirtää lämpöä. Lämmön siirtyminen tapahtuu liikkuvan fluidin ja rajaavan pinnan välillä, ja se johtuu satunnaisen

molekyyliliikkeen eli diffuusion, ja fluidin makroskooppisen liikkeen yhtäaikaisesta vaikutuksesta. Fluidin ja rajapinnan vuorovaikutus luo fluidin alueen, jossa sen nopeus vaihtelee pinnan nolasta johonkin rajalliseen arvoon mentäessä pinnasta pois päin. Tätä aluetta kutsutaan nopeuden rajakerrokseksi. Myös fluidin ja pinnan välinen lämpötilaero luo lämpötilarajakerroksen, ja aina kun pinnan lämpötila on suurempi kuin fluidin, tapahtuu niiden välillä konvektiota. Konvektiota tapahtuu luonnollisesti, kun virtaavan fluidin tiheys alenee sen lämpötilan noustessa, jolloin nostevoima siirtää sen ylöspäin ja kylmä tiheä ilma korvaa sen. Konvektio voi olla myös pakotettua, jolloin fluidin liike saadaan aikaan esimerkiksi puhaltimen, pumpun tai tuulen voimalla. Newtonin jäähtymislain avulla voidaan esittää määräyhtälö muodossa

$$q'' = \alpha(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

jossa q'' [W/m^2] on jälleen lämpövuoto, α [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] on lämmönsiirtokerroin konvektiolle, T_s on pinnan lämpötila [K] ja T_∞ on lämpötila [K] lämpötilarajakerroksen ulommalla reunalla. (Incropera et al. 1996, 6.)

Lämpösäteily mahdollistaa lämmönsiirron ilman väliainetta, sillä sen lämmönsiirto perustuu fotonien tai elektromagneettisten aaltojen siirtämään energiaan. Kaikki kappaleet, joilla on absoluuttisesta nolapisteestä poikkeava lämpötila, lähettävät eli emittoivat lämpösäteilyä. Lämpösäteilyä vastaanottava kappale absorboi säteilyä, jolloin sen hiukkasten kiihtyminen nostaa kappaleen lämpöenergiaa. Vastaanottavan kappaleen absorptiokyky ja emissiivisyys riippuvat sen materiaalin ja pinnan ominaisuuksista, kuten esimerkiksi läpinäkyvyydestä. Nettosäteilylämmönvaihto voidaan esittää muodossa

$$q_{rad} = \alpha_r A (T_s - T_{sur}) \quad (3)$$

jossa α_r [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] on lämmönsiirtokerroin, A on kappaleen pinta-ala [m^2], T_s on pinnan lämpötila [K] ja T_{sur} on ympäristön lämpötila [K]. Lämmönsiirtokerroin lämpösäteilylle on täten

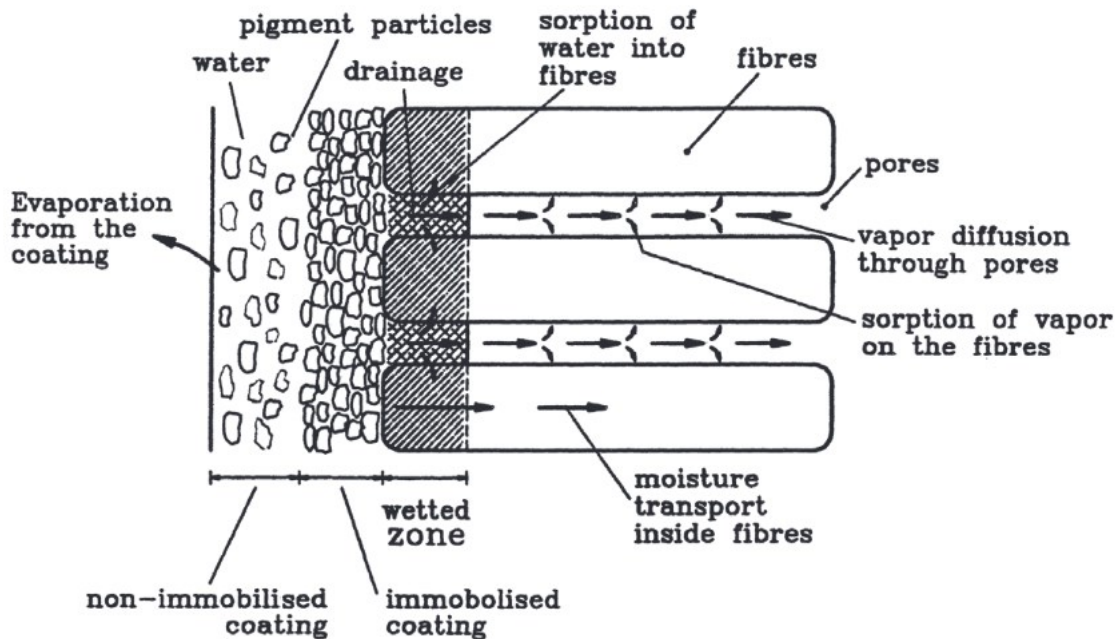
$$\alpha_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \quad (4)$$

jossa ε on emissiivisyys, eli kerroin, joka kuvaa säteilyn määrää verrattuna mustan kappaleen, eli ideaalisäteilijän säteilyyn, ja σ on Stefanin-Boltzmannin vakio ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$), eli verrannollisuuskertoin, joka kuvaa mustan kappaleen säteilytehon pinta-ala yksikköä kohden sen termodynaamisen lämpötilan funktiona. (Incropera et al. 1996, 8–9.)

2.2 Päälystetyn paperin ja kartongin lämmön- ja massansiirto

Kuivatus on prosessi, jossa lämmön avulla poistetaan kosteutta tuotteesta niin, että lopputulos on kiinteä. Kuivaus perustuu kahteen samanaikaiseen prosessiin, jotka ovat lämmön siirtyminen ympäristöstä tuotteen pinnalle, jolloin tapahtuu haihtumista pinnalta, ja sisäisen kosteuden siirtyminen pinnalle ja sitä seuraava pintahaihtuminen. Kuivauksessa tapahtuu siis samanaikaisesti lämmön- ja massansiirtoa. Olennaisimmat ulkoiset ehdot ja sen muuttajat ensimmäisenä mainitussa prosessissa ovat lämpötila, ilmankosteus, ilman virtaama ja sen suunta, kiinteän aineen fyysiset ominaisuudet ja sen kannattelu kuivatuksen aikana. (Mujumdar 2015, 4–5.). Lämpötilagradientti syntyy kiinteään aineeseen, kun siitä haihtuu kosteutta lämmönsiirron seurauksena. Tällöin kosteus siirtyy kiinteästä aineesta pinnalle diffuusion, kapillaarivirtauksen, kuivauksen aikana kutistumisen aiheuttamien sisäisten paineiden, toistuvan haihtumisen ja kondensoitumisen avulla. (Mujumdar 2015, 12–13.)

Heikkilän (1993, 19.) tutkimuksen mukaan päälystetyn paperi- tai kartonkirainan kosteuden poistuminen tapahtuu kahdella mekanismilla, jotka ovat haihtuminen ja nesteen imeytyminen pohjarainaan. Myös molekyyli-, pinta- ja höyrydiffuusio ovat olennaisia massansiirtomekanismeja päälysteen kuivauksessa. Imeytymismekanismia on kaksi, joista ensimmäinen on materiaalin huokoisuudesta johtuva nestettä imevä kapillaarivoima Lucas-Washburnin yhtälön mukaisesti ja jälkimmäinen on diffuusio.



Kuva 9. Päällystetyn rainan lämmön- ja massansiirto (Heikkilä 1993, 20)

Kuvassa 9 nähdään periaate päällystetyn rainan lämmön- ja massansiirrosta. Kuvassa on esitetty jähmettyneen ja märän päällysteen alueet. Vesi siirtyy märästä kerroksesta kuivemmalle, eli imeytyy pohjarainaan. Jähmettyneen päällysteen kerros muodostuu vähitellen stabiloiden päällysteen. Päällysteen ja pohjarainan rajapinnalle syntyy märkä kerros johtuen veden kerääntymisestä rajapinnan lähelle. Märän kerroksen syvyys riippuu imeytyneen nesteen kokonaismäärästä. Imeytymisprosessi kestää niin kauan, että koko päällyste on jähmettynyt, ja on näin ollen stabiloitunut. Imeytymisen määrään ja sen nopeuteen vaikuttaa pohjarainan sorptio-ominaisuudet, päällysteaineiden ominaisuudet, päällysteen neliöpaino, jähmettyneen päällystekerroksen läpäisevyys ja veden lämpötilasta riippuva viskositeetti. Pohjaan absorboituvan veden määrä pitää minimoida, jotta turpoamisen ja kuivatuskutistuman vaikutukset päällysteen loppulaatuun olisivat mahdollisimman vähäisiä. Yhtäaikaaisesti imeytymisen kanssa tapahtuu päällysteen avonaiselta pinnalta nesteen haihtumista ilmaan. (Heikkilä 1993, 20–21.)

Ennen päällysteen jähmettymistä haihtuminen tapahtuu kuten märältä pinnalta, ja siksi päällysteen lämpötila ei ylitä puhallusilman määrittämää märkälämpötilaa, mikä tyypillisesti on n. $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Koska lämpötila ei voi nousta päällysteen sideaineille liian korkeaksi, alkukuivatus,

eli vapaan veden haihdutus voidaan tehdä erittäin tehokkaasti (High intensity). Samalla veden imeytymisaika pohjaan minimoituu. (Heikkilä 1993, 20–21.)

Paperi- tai kartonkiradan lämmön siirtymisen, ja radan ja ympäristön välisen haihtumisen laskentamallin lämmönsiirtokertoimien reunaehtoina voidaan pitää konvektio-, kontakti- ja lämpösäteilykertoimia. Konvektiolämmönsiirtokerroin esitetään muodossa

$$\alpha_{conv} = \frac{q_{conv}}{(T_a - T_s)} \quad (5)$$

jossa q_{conv} on konvektiolämpövuoto [W/m^2], T_a on ilman lämpötila [K] ja T_s on radan pinnan lämpötila [K]. (Heikkilä 1993, 60.)

Kontaktilämmönsiirtokerroin on vastaavasti muotoa

$$\alpha_{cont} = \frac{q_{cont}}{(T_d - T_s)} \quad (6)$$

jossa q_{cont} on kontaktilämpövuoto [W/m^2] ja T_d on kosketuskuivaimen pinnan lämpötila [K]. (Heikkilä 1993, 60.)

Infrapunakuivauksessa voidaan määrittää lämmönsiirto olettamalla, että absorptio on tasainen koko radan paksuudella, ja että säteilyteho on tasaisesti jakautunut emitterin pinnalla. Lämmönsiirto voidaan täten esittää muodossa

$$q_{abs} = \frac{P_{input}}{l_{eff}} \eta_{abs} \quad (7)$$

jossa P_{input} on emitterin syöttöteho [W] ja P_{input}/W on syöttöteho yksikköpituutta kohti, l_{eff} on emitterin pituus [m] koneen pituussuunnassa ja η_{abs} on säteilyn kokonaishyötysuhde, joka muodostuu rainaan imeytyvän säteilyenergian ja emitterin syöttötehon suhteesta. Myös konvektioreunaehdot pätevät lisänä infrapunakuivauksessa. (Heikkilä 1993, 60.)

Massansiirron reunaehtoina käytetään kahta yhtälöä, joista toisessa huomioidaan haihdutusrintaman sijoittuminen materiaalin sisälle, jolloin materiaalin läpi tapahtuva diffuusio heikentää höyryn painetta. Ensimmäisenä mainitussa tapauksessa haihtumista vedellä kylläste-tyistä pinnoista voidaan kuvata yhtälöllä

$$\frac{\dot{m}_{ev}}{A} = \alpha C \ln \frac{P_{tot} - p_{va}}{P_{tot} - p'v} \quad (8)$$

jossa vakio C on $7,03 \times 10^{-4} \text{ kgH}_2\text{O } ^\circ\text{C/W/s}$ kuivalle ilmalle välillä $0\text{--}200 \text{ } ^\circ\text{C}$ normaalissa ilmanpaineessa ($101,3 \text{ kPa}$), ja p_{va} ja p'_v ovat höyryn osittaispaineita [Pa] haihdutuspinalla. Lämmön- ja massansiirron yhteys kuivauksessa voidaan huomata lämmönsiirtokertoimen esiintymisenä massansiirron yhtälössä. (Heikkilä 1993, 61.)

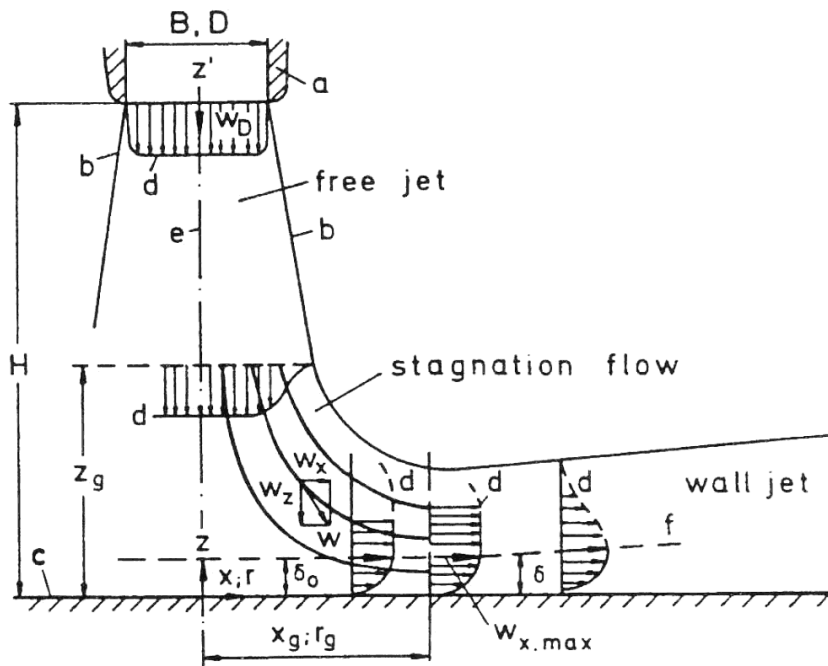
2.3 Puhallussuuttimet

Teollisessa kuivatuksessa hyödynnetään usein pakotettuun konvektioon perustuvia kuivaimia, joiden yksittäiset puhallussuuttimet tai useammasta suuttimesta koostuvat suutinryhmät puhaltavat päältäpäin kuivatettavan tuotteen pintaan mahdollistaen tehostetut lämmön- ja massansiirtokertoimet. Teollisia käyttökohteita ovat muun muassa tekstiiliteollisuus, lasiteollisuus, muoviteollisuus ja tämän tutkimuksen kannalta olennaiset paperi- ja kartonkiteollisuudet. (Martin 1977, 1–2.)

Martinin (1977, 2) mukaan puhallussuutinten lämmön- ja massansiirtoa ratkaistaessa on olennaista tunnistaa ongelman päämuuttujat, jotka ovat kaasun virtaama, suuttimen raon leveys tai reiän halkaisija, suutinten jako ja puhallusetäisyys kuivattavan tuotteen pintaan. Aiemmistä empiirisistä tutkimuksista on saatu kattava määrä tietoa virtausdynaamisista, lämmön ja materiaalien reunaehdoista, joilla voidaan ennustaa lämmön ja massansiirtoa yksittäisissä suuttimissa ja suutinryhmissä (Martin 1977, 2).

Kuvassa 10 nähdään suuttimista purkautuvat suihkun geometriset ja virtausdynaamiset ominaisuudet, jotka jakautuvat kolmeen alueeseen. Nämä alueet ovat vapaan virtauksen alue, stagnaatio- eli pysähtymisalue ja seinämävirtausalue. Vapaan virtauksen alueella suuttimen raosta tai reiästä purkautuva virtaus on ominaisuuksiltaan turbulenttinen ja tasaisen nopeusprofiilin omaava virtaus, joka laajenee etäisyyden kasvaessa suuttimesta pois päin, kun taas virtauksen ydin supistuu etäisyyden kasvaessa. Virtausprofiili ytimen jälkeen on epätasaista koko virtausalueen poikki, ja keskellä sijaitseva maksimivirtausnopeus pienenee etäisyyden kasvaessa. Kun virtaus lähestyy kohdepintaa, alkaa se hidastumaan pystysuunnassa ja kiihtymään vaakasuunnassa kohdepintaa pitkin virtauksen pysähtymisalueella. Ympäröivien olosuhteiden ja virtauksen rajallisen leveyden vuoksi kiihtyvyys ei voi jatkua loputtomiin, joten se muuttuu jälleen hidastuvaksi seinämävirtausalueeksi vaihtaessaan liikemäärää ympäristön kanssa. Seinämävirtauksen ja kohdepinnan suuntainen virtausnopeuskomponentti

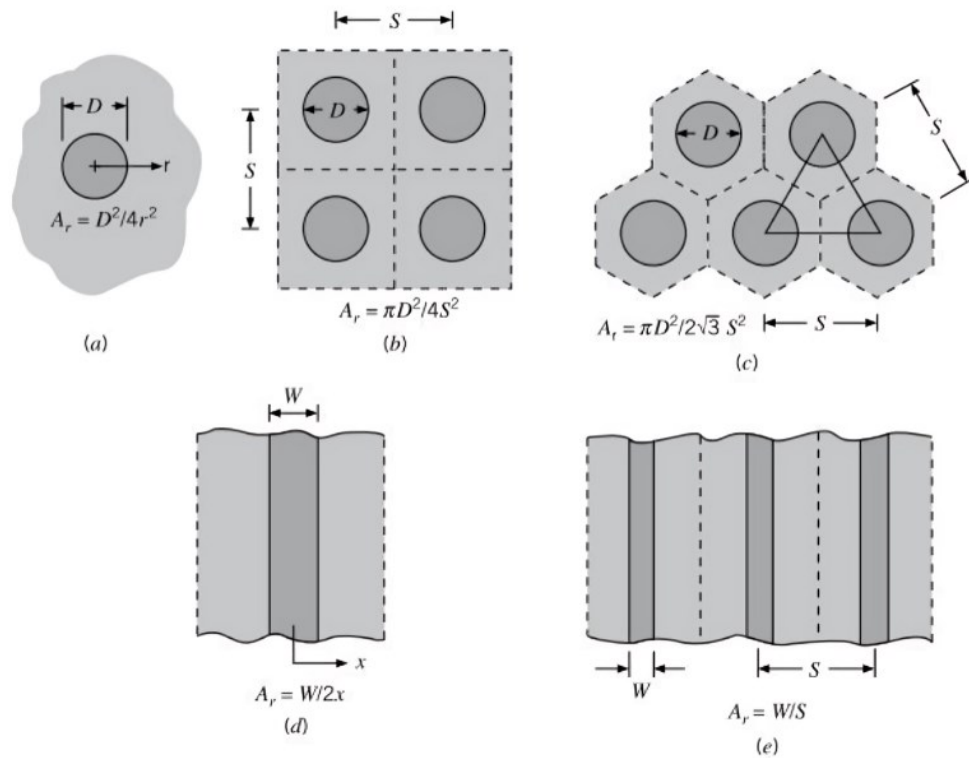
kasvaa lineaarisesti, kunnes se saavuttaa maksimiarvonsa, jonka jälkeen ennen pitkää se laskee noltaan saavuttaen täydellisen seinämävirtauksen. (Incropera et al. 1996, 387–388.)



Kuva 10. Suuttimesta purkautuvan ilman virtauskenttä (Martin 1977, 3)

Useamman suuttimen järjestelyissä puhallusten seinämävirtausalueet törmäävät vierekkäisten suuttimien seinämävirtauksiin, jolloin muodostuu toissijaisia pysähtymisalueita suuttimien väliin. Poistoilma ei kaikissa tapauksissa pääse virtaamaan suoraan suuttimien välistä ylöspäin, vaan se kulkeutuu ensin suuttimen pituussuuntaan symmetrisesti, heikentäen lämmönsiirtoa. Ideaalitulanteessa poistoilma pääsee virtaamaan suoraa ylöspäin suuttimien välistä. (Incropera et al. 1996, 388.)

Kuvassa 11 nähdään tyypillisiä suutinreikä ja -rakojärjestelyjä, joita ovat yksittäiset reiät ja raot, neliömäiset reikäryhmät, porrastetut reikäryhmät ja säännöllisen jaon rakoryhmät. Katkoviivoilla on rajattu reikä- ja rakoryhmät yksikkökennoihin, joiden jakoa kuvaa kirjain S . Neliömäisessä asetelmassa olevien suutinreikien yksikkökennot ovat muodoltaan neliöitä, kun taas porrastetuissa reikäasetelmissä kennot ovat muodoltaan kuusikulmioita. Suhteellinen suutinpinta-ala on olennainen parametri paikallisten ja keskimääräisten konvektiokerrotoimien laskennassa, ja se määritellään suuttimen ulostulon poikkileikkausalan suhteena yksikkökennon pinta-alaan. (Incropera et al. 1996, 388.)



Kuva 11. Suutinreikien ja -rakojen järjestelyjä (Incropera et al. 1996, 388)

Martinin (1977, 15) mukaan yhden reiän suuttimen (kuva 11, (a)) massan- ja lämmönsiirto voidaan laskea kaavalla, joka on muotoa

$$\left(\frac{Sh_1}{Sc^{0.42}}\right)_{SRN} = \left(\frac{Nu}{Pr^{0.42}}\right)_{SRN} = \frac{D}{r} \frac{1-1.1\frac{D}{r}}{1+0.1\left(\frac{H}{D}-6\right)\frac{D}{r}} F(Re) \quad (9)$$

jossa Sh on Sherwoodin luku, Sc on Schmidtin luku, Nu on Nusseltin luku, Pr on Prandtlin luku, D on reiän halkaisija, r on yksikkökennon kehän säde [m], H on puhallusetäisyys [m] ja Re on Reynoldsin luku.

Funktio $F(Re)$ voidaan approksimoida eksponenttifunktioilla, jotka ovat

$$2000 < Re < 30000 \quad F(Re) = 1.36Re^{0.574}$$

$$30000 < Re < 120000 \quad F(Re) = 0.54Re^{0.667}$$

$$120000 < Re < 400000 \quad F(Re) = 0.151Re^{0.775}$$

Funktio voidaan myös esittää käyrän muodossa, jolloin se on muotoa

$$F(Re) = 2Re^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{Re^{0.55}}{200} \right)^{0.5} \quad (10)$$

jolloin voimassaoloalue on

$$2000 \leq Re \leq 400000$$

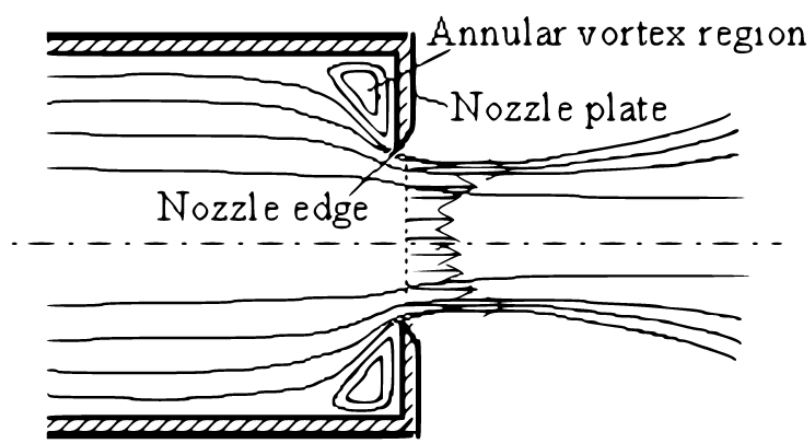
$$2,5 \leq r/D \leq 7,5 \quad (0,04 \geq f \geq 0,004)$$

$$2 \leq H/D \leq 12 \text{ (Martin 1977, 15–16.)}$$

Suutinten rei'issä virtausnopeus ja painevastus kasvavat, jolloin virtaus kuristuu aiheuttaen nopeamman paikallisen virtausnopeuden. Virtauksen reunoilla on tällöin suuri nopeusgradientti ja virtauksen keskellä suurin nopeus (kuva 12). Reunojen suuri nopeusgradientti on seurausta ulostulonopeusvektorin osoittamisesta virtauksen keskukseen virtauksen supistumisen vuoksi. Tämä parantaa purkautuvan fluidin sekoittumis- ja leviämisominaisuuksia virtauksen ollessa turbulentsista, jolloin myös lämmönsiirto-ominaisuudet paranevat. Kuristuneen virtauksen kuroumakerroin ε voidaan laskea kaavalla

$$\varepsilon = \frac{v_t}{v_m} \quad (11)$$

jossa v_t on teoreettinen virtausnopeus [m/s] ja v_m on mitattu virtausnopeus [m/s]. (Shakouchi & Kito 2012, 443–444.)



Kuva 12. Kuristunut virtaus suuttimen aukossa (Shakouchi et al. 2012, 444)

Ilmakuivainten suutinten puhallusnopeus voidaan määrittää suutinkammion staattisen ylipaineen ja ilman tiheyden avulla, kaavalla

$$v_a = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_a}} \quad (12)$$

jossa ΔP on suutinkammion ylipaine [Pa] ja ρ_a on ilman tiheys [kg/m^3].

Konvektiokuivauksessa vaikuttaa myös aina lämpösäteily, sillä kuten aiemmin mainittu, kaikki lämpöä omaavat pinnat säteilevät lämpöä. Lämmönsiirtokerroin suutinten lämpösäteilylle voidaan laskea kaavalla

$$\alpha_{rad} = \frac{\sigma \varepsilon_d \varepsilon_s}{1 - (1 - \varepsilon_d)(1 - \varepsilon_s)} \frac{T_d^4 - T_s^4}{T_a - T_s} \quad (13)$$

jossa σ on Stefanin-Boltzmannin vakio, ε_d on suutinpinnan emissiivisyys ja ε_s on vastapinnan absorboivuus. T_a on puhallusilman lämpötila [K], T_d suuttimen pinnan lämpötila [K] ja T_s rainan lämpötila [K]. (Heikkilä 1993, 100.)

2.4 Virtauslaskenta

Numeerinen virtauslaskenta perustuu niin kutsuttuun äärellisen tilavuuden menetelmään, jossa laskenta-alue jaetaan pieniin yksikkösoluihin, jossa säilymisperiaatetta kuvaavat osittaisderivaatat voidaan ilmaista lineaaristen algebrallisten yhtälöiden joukkona jokaisessa solussa. Näiden yhtälöiden numeerisessa laskennassa hyödynnetään iteratiivista menetelmää, joka tuottaa numeerisen virheen laskennan diskretisoinnin myötä. Tätä virhettä voidaan pienentää pienentämällä myös yksikkösolun kokoa, mutta toisaalta tämä lisää laskentatehon tarvetta ja näin ollen laskenta-aikaa. Yksikkösolun koko voidaan siis asettaa laskennan kannalta myös tarpeettoman pieneksi, ja riittävän tarkkoja tuloksia tuottavan laskentahilan luonti onkin eräs tärkeä osa CFD-laskentaa. (Andersson & Andersson 2012, 42.)

2.4.1 Konvergenssi

Tulosten oikeellisuuden arvioinnissa voidaan hyödyntää tulosten konvergoitumisen seuraamista, joka määrittää mikä on riittävä määrä laskennan iterointeja. Konvergenssilla

tarkoitetaan tulosten yhtenäisyyttä ja vakautta, ja yleisesti CFD-laskennassa algebralliset yhtälöt ratkaistaan iteratiivisesti. Tulosten voidaan todeta konvergoituneen, kun diskreetit yhtälöt saavuttavat tietyn toleranssin jokaisessa solmussa, numeeriset ratkaisut eivät muutu enää uusissa iteroinneissa, ja kun massa-, liike- ja skalaaritasapaino saavutetaan. Iterointien kehittyessä voidaan tarkkailla diskreettien yhtälöiden epätasapainoa ja virheitä residuaalien avulla, jotka mittaavat laskennan epätasapainojen laajuutta. Kun residuaalit pienenevät laskennan edetessä ja asettuvat jollekin ääriselle tasolle, tulos konvergoituu. Konvergoitunut tulos ei välttämättä kuitenkaan ole validi, joten myös massa- ja lämpötasetta tulee seurata, sekä tulosten muuttamattomuutta iteraatioiden edetessä. (Tu & Yeoh & Liu 2018, 222–223.)

2.4.2 Turbulenttisen virtauksen mallinnus

Turbulenttisia virtauksia esiintyy luonnollisesti esimerkiksi ilmakehässä, merissä ja joissa, kun taas teollisuudessa niitä esiintyy esimerkiksi pumpuissa ja turbiineissa. Turbulenttisia virtauksia hyödynnetään muun muassa lämmönvaihtimissa ja kemiallisissa reaktoreissa. Turbulenssin hyödyntäminen teollisissa sovelluksissa perustuu sen kykyyn parantaa lämmön- ja massansiirtoa merkittävästi, sillä fluidit sekoittuvat tehokkaammin konvektion tehostuessa. (Andersson 2012, 86.)

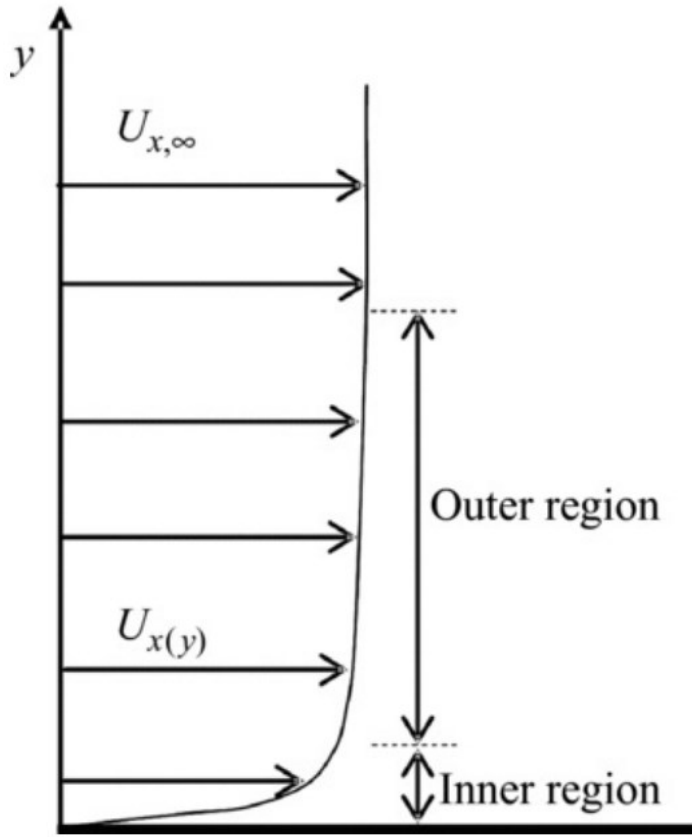
Turbulenssin mallintaminen on haastavaa, sillä turbulenttisen virtauksen ominaisuuksiin kuuluu nopeasti vaihtelevat virtausnopeudet pienen skaalan korkeilla taajuuksilla, jolloin vaaditaan suuri määrä tietoa ilmiön kuvaamiseen. Näin ollen korkean Reynoldsin luvun omaavien virtauksien mallinnus tarkasti on käytännössä liian aikaa ja laskentatehoa vievää. Laskentaa voidaan yksinkertaistaa poistamalla hallitsevista yhtälöistä pieniskaalaisten korkeataajuuksien vaihtelut. Poiston yhteydessä yhtälöihin kuitenkin tulee lisää tuntemattomia muuttujia, jotka voidaan ratkaista erilaisilla turbulenssimalleilla. Näitä malleja ovat muun muassa Large-eddy-simulation (LES) ja Reynolds-averaged Navier-Stokes -malli (RANS). Turbulenttisia virtauksia voidaan myös mallintaa Direct numerical simulation -menetelmällä, (DNS), jossa ei ole erikseen turbulenssimallia, vaan Navier-Stokes yhtälöt ratkaistaan suoraan, ja ne kuvaavat laminaariset ja turbulenttiset virtaukset oikein. DNS on näistä kolmesta menetelmästä eniten laskentatehoa vaativa, sillä se vaatii erittäin tiheän laskentahilan ja lyhyet aika-askleet. Vähiten laskentatehoa vaativa menetelmä on käyttää RANS-turbulenssimallia. RANS-mallin alimalleja ovat Reynolds stress model (RSM), kahden yhtälön

mallit, yhden yhtälön mallit ja nollan yhtälön mallit. Yksinkertaisten virtausten mallinnuksessa saadaan luotettavia tuloksia jo yhden yhtälön malleilla, ja sitä voidaan myös käyttää monimutkaisempien laskentojen alkuvaiheessa suunnittelumuutosten seulonnassa. (Andersson 2012, 106.)

Tämän tutkimuksen mallinnuksessa hyödynnetään kahden yhtälön RANS-turbulenssimalliin kuuluvaa, Menterin (1993) kehittämää Shear stress transport (SST) $k-\omega$ -mallia. Se hyödyntää aiemmin Wilcoxin kehittämää $k-\omega$ -mallia rajakerroksen sisemmällä alueella ja vaihtaa $k-\epsilon$ -malliin ulommilla alueilla ja vapaissa leikkausvirroissa. Näin ollen se tekee SST-versiosta tarkemman ja luotettavamman kuin alkuperäinen Wilcoxin $k-\omega$ -malli. (Menter 1994, 1.) SST $k-\omega$ -malli on Fluentin oletusasetus turbulenssin mallinnukselle.

Seinämien lähellä fluidin ja seinämän välinen suhteellinen nopeus vaihtelee nopeasti, ja seinämän kohdalla se on nolla. Tätä kutsutaan no-slip-ehdoksi. Ilmiö perustuu satunnaisesti liikkuvien molekyylien suhteellisen liike-energian siirtymiseen seinämään niiden törmäyksissä, jolloin myös takaisin kimpoavat molekyylit hidastavat virtausta seinämän kohdalla. Tämä ilmiö synnyttää niin kutsutun rajakerroksen seinämän kohdalle, jossa poispäin mentäessä virtausnopeus muuttuu nopeasti seinämässä olevasta nollasta vapaan virtauksen nopeuteen (kuva 13). Rajakerrokset yleisesti voivat olla luonteeltaan joko turbulenttisia tai laminaarisia riippuen Reynoldsin luvun suuruudesta. Rajakerrosten määrittäminen CFD-laskennassa on tärkeää, sillä korkeilla Reynoldsin luvuilla rajakerrokset ovat turbulenttisia ja ne aiheuttavat enemmän vastusta. (Andersson 2020, 132–133.)

Rajakerros voidaan jakaa erilaisiin alikerroksiin, joista tärkeimmät laskennan kannalta ovat viskoosinen alikerros heti seinämän jälkeen ja logaritminen kerros hieman kauempana. (Andersson 2020, 133)



Kuva 13. Turbulenttisen virtauksen rajakerros (Andersson 2012, 133)

Alikerrokset kuvataan yleensä fyysisessä muodossa seinämämuuttujilla, jolloin nopeusasteikko alikerroksille ilmaistaan yhtälöllä

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}} \quad (14)$$

jossa u_τ on seinämän kitkanopeus [m/s] ja τ_{wall} on seinämän leikkausjännitys [N/mm^2].

Nopeus dimensiottomassa muodossa on näin ollen

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (15)$$

Seinämäetäisyys voidaan esittää dimensiottomassa muodossa yhtälöllä

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (16)$$

jossa y on etäisyys seinämään ja ν on kinemaattinen viskositeetti [m^2/s].

Sisempi rajakerros voidaan luokitella alikerroksiinsa y^+ -arvoittain seuraavasti

- Viskoosinen alikerros $0 < y^+ < 5$.
- Vaimennusalikerros $5 < y^+ < 30$.
- Logaritminen alikerros $30 < y^+ < 400$ (Andersson 2012, 134–135.)

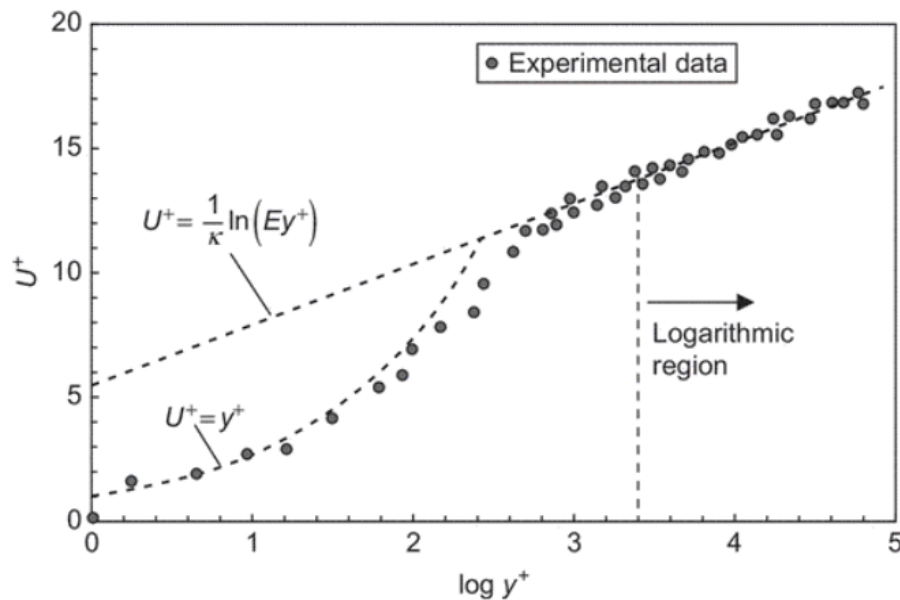
Kuvassa 14 nähdään rajakerrosten ennustettava profiili perustuen dimensiottoman nopeuden muotoon logaritmisessa ja lineaarisessa muodossa. Viskoosisessa alikerroksessa voidaan havaita lineaarinen dimensiottoman nopeuden ja etäisyyden suhde muodossa

$$u^+ = y^+ \quad (17)$$

Ja sen ulkopuolella, turbulentsissa rajakerroksessa logaritminen suhde muodossa

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + C \quad (18)$$

Jossa k on kerroin 0,41 ja C on kerroin 5,0 sileille pinnoille. (Rodriguez 2019, 97.)



Kuva 14. Seinämälaki (Tu et al. 2018, 275)

Laskenta voidaan suorittaa hyödyntämällä seinämäfunktioita tai ratkaisemalla viskoosinen alikerros. Seinämäfunktiomenetelmässä voidaan asettaa rajakerroksia tietyn etäisyyden päähän seinämästä, jotta vältetään turbulenssimallin ratkaisulta seinämän läheltä ja

laskennallisten solmujen määrä vähenee. Seinämäfunktiomenetelmässä ei lasketa viskoosista- ja vaimennusalikerrosta, joten se on niin sanottu korkean Reynoldsin luvun turbulenssimallinnusta. Alhaisen Reynoldsin luvun mallinnuksessa, eli viskoosisen alikerroksen ratkaisussa ratkaistaan virtaus sisemmän rajakerroksen läpi, jolloin laskenta vaatii enemmän laskennallisia solmuja. (Tu et al. 2018, 272.) Tu et al. (2018, 272) suosittelevat tutkimukseensa $k-\omega$ -mallien käyttämistä alhaisen Reynoldsin luvun mallinnuksissa.

Mallinnuksessa y^+ -arvo tulisi asettaa ensimmäiseen solmuun seinämän lähelle niin, että se on arvoltaan 1, mutta suuremmat lukemat ovat hyväksyttäviä, kunhan ne ovat viskoosisen alikerroksen rajoissa ($y^+ < 5$) (Tu et al. 2018, 277).

3 Suutinten virtaussimulointi

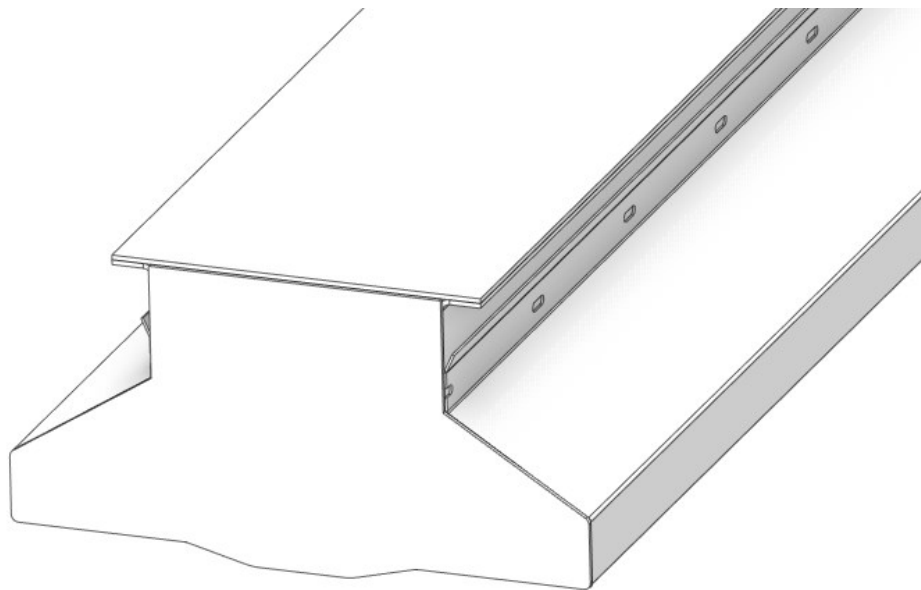
Eri suuttimille hyödynnettiin toistuvaa työnkulkua samoilla reunaehdoilla, jossa laskennallinen virtauskenttä sisälsi yhden suuttimen ja kuvitellun paperi- tai kartonkirainan. Ensimmäisenä tutkittiin CFD-laskennan ja analyttisen ratkaisun tuloksien yhteneväisyyttä. Lisäksi tutkittiin virtauksen kuristumaa erilaisissa reikägeometrioissa, sillä kuroumakertoimen avulla voidaan määrittää massavirran suuruus halutun puhallusnopeuden aikaansaamiseksi, ja toisaalta myös suuttimen reikien valmistustapa vaikuttaa reiän muotoon.

3.1 Koejärjestelyt

Tutkimuksessa toteutettiin simuloiteja eri tilanteissa, joissa varioitavia parametreja olivat puhallusetäisyys, puhallusnopeus ja puhalluslämpötila niin rainan staattisissa kuin liikkuvissa tilanteissa. Lopuksi tutkittiin, kuinka reikäkoon ja -jaon muuttaminen vaikutti tuloksiin. Tutkimuksessa suoritettiin myös herkkyysanalyysi yhdelle simulointitapaukselle, jotta voitiin varmistua tulosten reliabiliteetista. Analyysissä tutkittiin laskentahilan tiheyden ja turbulenssimallin vaikutusta tuloksiin.

3.1.1 Laskentageometrian luonti

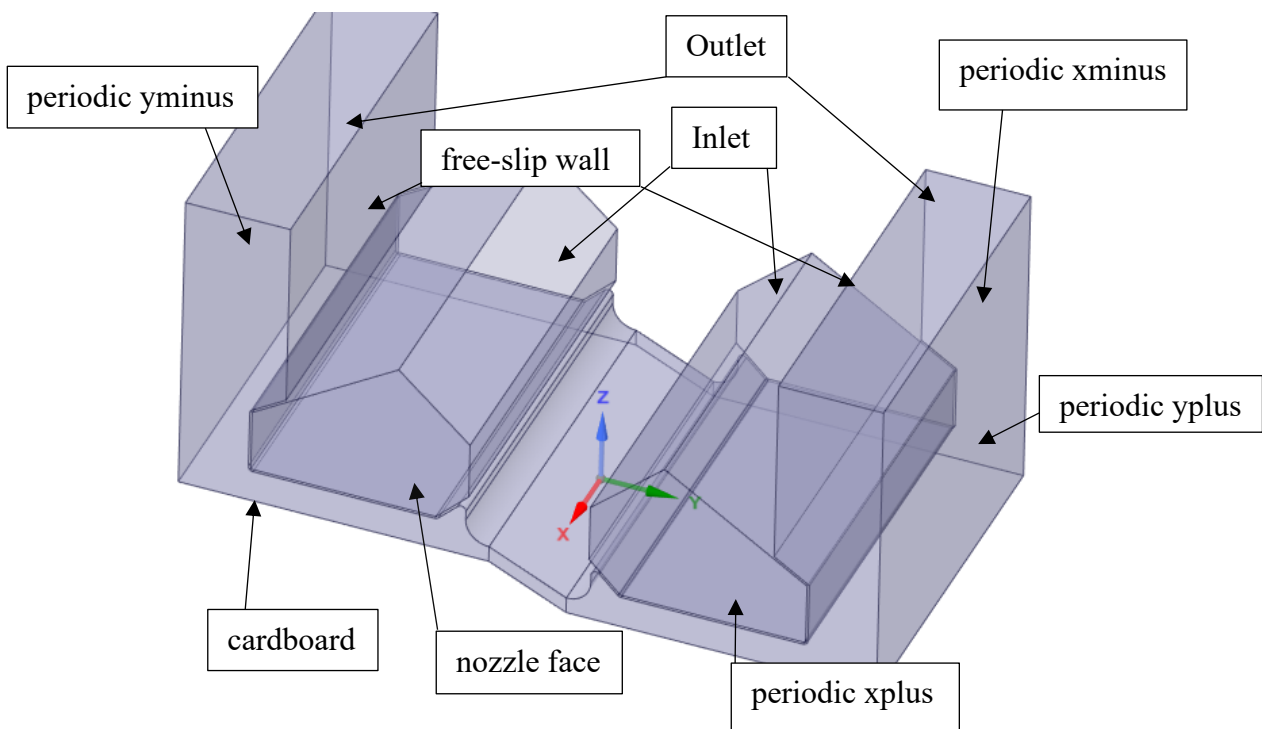
Puhallussuuttimista vietiin solidimallit (kuva 15) CATIA-mallinnusohjelmasta .stp-muodossa Ansys SpaceClaim-ohjelmaan jälkikäsiteltäviksi. SpaceClaimissa suuttimen solidin ympärille mallinnettiin suorakaiteen muotoinen kehys rajaamaan laskennan virtauskenttää. Deaktivoimalla suuttimen solidi, jäi aiemmin luotuun kehukseen solidin muotoja vastaava tyhjiö. Solidin jättämä tyhjiö ja kehys yhdessä muodostivat suljetun virtauskentän, jonka geometrisia ominaisuuksia voitiin hyödyntää reunaehtojen asettamisessa. Menetelmä soveltoi hyvin suuttimen virtauskentän määrittelyyn, sillä ilma purkautuu suuttimen sisältä ulospäin, ja näin ollen myös sen sisäiset rakenteet ovat olennaisia virtauslaskennan kannalta.



Kuva 15. Käsittelemätön suutinmalli

Mallista poistettiin laskennan kannalta turhia geometrisia piirteitä, kuten suuttimen ulkoiset ilman tuloaukot ja sisäiset reikälevyt. Myös laskennan kannalta epäolennaisia pyöristyksiä poistettiin suutinkammion sisältä laskennan nopeuttamiseksi, ja kehys rajattiin ulkoreunoiltaan vastaamaan yhden suuttimen todellista virtauskenttää. Rajat asetettiin mallinnetun suuttimen ja kuvitteellisen viereisen suuttimen välissä olevan imuraon keskelle rainan kulku-suunnassa, eli tässä tapauksessa koordinaatiston y-suunnassa. Näin ollen yksittäisen

suuttimen poistoilma täytti puolet imuraon tilavuudesta. Kehyksen alapinnan asema asetettiin vastaamaan kuviteltua rainan etäisyyttä suutinpinnasta, jolloin myös alapinta itsessään toimi rainapintana. Laskennan nopeuttamisen vuoksi pitkä suutinmalli leikattiin suuttimen poikki- eli x-suunnassa periodiseksi osioksi, jossa virtausten kuvitellaan olevan toistuvia, ja peräkkäin asetetut osiot muodostavat suuttimen koko pituuden. Periodisen osan leveyden määrittelyyn vaikutti reikien jako, sillä reiät ovat porrastettu mahdollisimman tasaisen suuttimen poikkisuuntaisen puhalluksen aikaansaamiseksi. Määrittelyä varten taulukoitiin pystyreikien rivien määrät, kallellaan olevien reikien määrät ja reikien väliset etäisyydet, joiden avulla periodisuus laskettiin. Malliin luotiin leikkaustasot mahdollisimman kauas rei'istä konvergenssin nopeuttamiseksi.

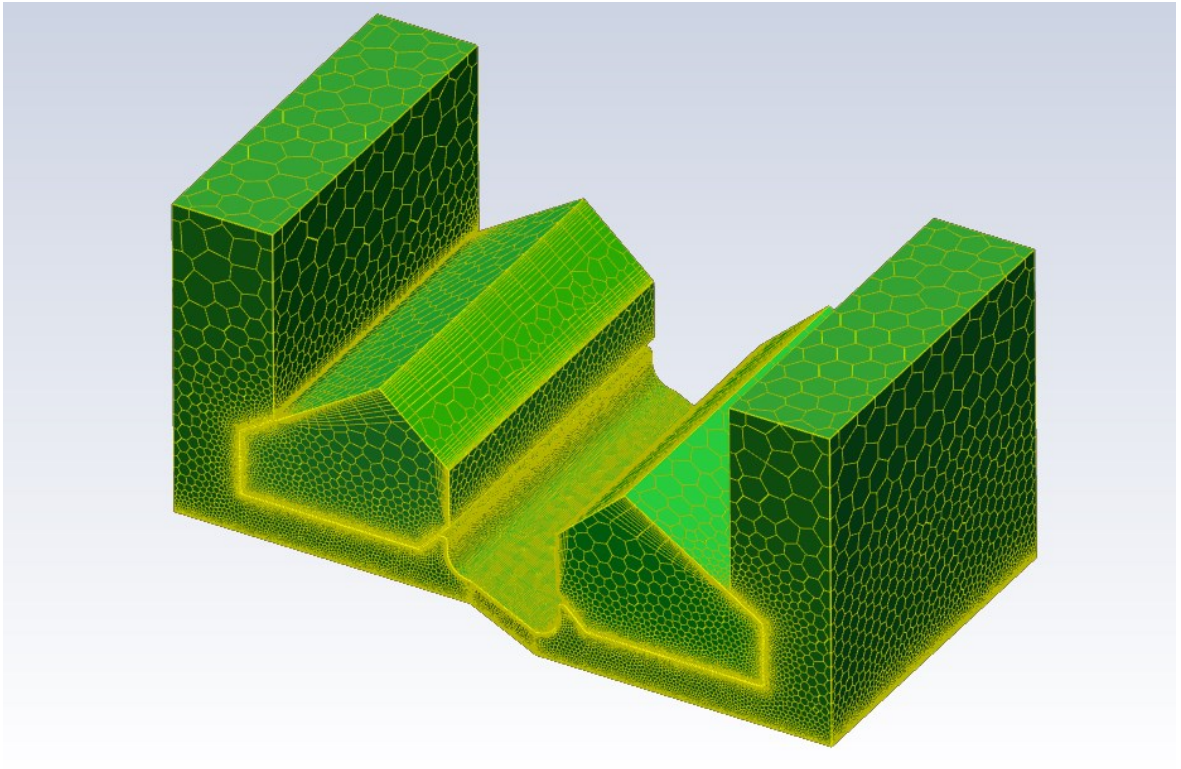


Kuva 16. SpaceClaim-ohjelmalla käsitelty suutinmalli

Käsitellyn, kuvassa 16 näkyvän suutinmallin pinnat ryhmiteltiin ja nimettiin uudestaan reunaehto- ja pintojen asettamisen helpottamiseksi verkotusta ja CFD-laskentaohjelmaa varten. Nimettyjä pintoja olivat virtauksen tuloaukko (inlet), virtauksen poistoaukot (outlet), kitkattomat suutinpinnat (free slip wall), suutinpinta (nozzle face) ja jäljelle jääneet muut pinnat nimettiin seinämiksi (wall).

3.1.2 Laskentahilan luonti

SpaceClaimilla jälkikäsitelty geometria avattiin Ansys Fluent -ohjelman verkotussovellukseen, jossa se määriteltiin tyypiltään vesitiiviiksi. Pintaverkotusta varten määriteltiin paikalliset elementtikoot rainapinnalle ja suutinpinnoille niin, että pintaverkko oli tiheämpi näiden osalta. Verkotusparametrit perustuvat aikaisempiin simulointeihin, ja tässä tutkimuksessa selvitettiin, soveltuuko samat parametrit suuttimen laajemmassa tutkimisessa. Rainalle asetettiin kohdekooksi 0,5 mm ja suutinpinnalle vastaavasti 1 mm. Pintaverkotuksen asetuksiin määriteltiin elementin minimikooksi 0,1 mm, maksimikooksi 20 mm ja kaarevuuden kulmaksi 18 °. Seuraavaksi asetettiin luodulle pintaverkolle periodiset reunaehdot aiemmin nimetyille periodic xminus-, ja xplus-pinnoille. Geometria määriteltiin sisältämään vain fluideista koostuvia alueita ilman yhtäkään solidia. Lopuille pinnoille asetettiin tarvittavat reunaehdot, eli määriteltiin tuloaukon tyyppi massavirtatuloaukoksi (mass-flow-inlet), poistoaukot painepoistoaukoiksi (pressure outlet) ja lisättiin muiden pintojen symmetriaehdot (symmetry). Poistoaukkotilavuuksia vastaavat vertikaaliset suutinpinnat ryhmiteltiin kitkattomiksi no-slip-walleiksi. Jäljelle jääneet pinnat ryhmiteltiin seinämiksi (wall). Rajakerrok- sia asetettiin kolmeen sijaintiin niin, että rainalle, suutinpinnalle ja seinämille kullekin tuli 10 kerrosta ja lisäksi rainalle asetettiin ensimmäisen korkeuden ehdoksi 0,01 mm. Lopuksi luotiin monitahokkaista koostuva volyymiverkko yksikkökopin maksimipituuden ollessa 20.



Kuva 17. Suuttimen laskentahila

Kuvasta 17 nähdään kuinka elementit ovat määrittelyn mukaisesti pienempiä suutinpinnan ja kartongin kohdilla, sillä niissä oletetaan tapahtuvan merkittävimmin eri virtausilmiöitä. Monitahokkaista koostuva hila kuuluu rakentamattoman hilan tyyppiin, jossa yksikkökoppien määrä on suurempi kuin rakenteellisessa hilassa, jossa kopit ovat muodoltaan neliöitä tai särmiöitä. Monitahokkaista koostuva rakenteeton laskentahila tuottaa rakenteellista hilaa tarkempia tuloksia ja nopeuttaa tulosten konvergenssia monimutkaisilla geometrioilla. (Tu et al. 2018, 152)

3.1.3 Ratkaisusetukset

Valmis volyymiverkkomalli avattiin Fluentin ratkaisijasovelluksella, jossa vaadittavat laskentareunaehdot voitiin asettaa. Ensimmäiseksi asetettiin laskennalle referenssilämpötila, jota Fluent hyödyntää pintalämmönsiirtokertoimen laskennassa. Fluentin käyttämä laskentakaava on muotoa

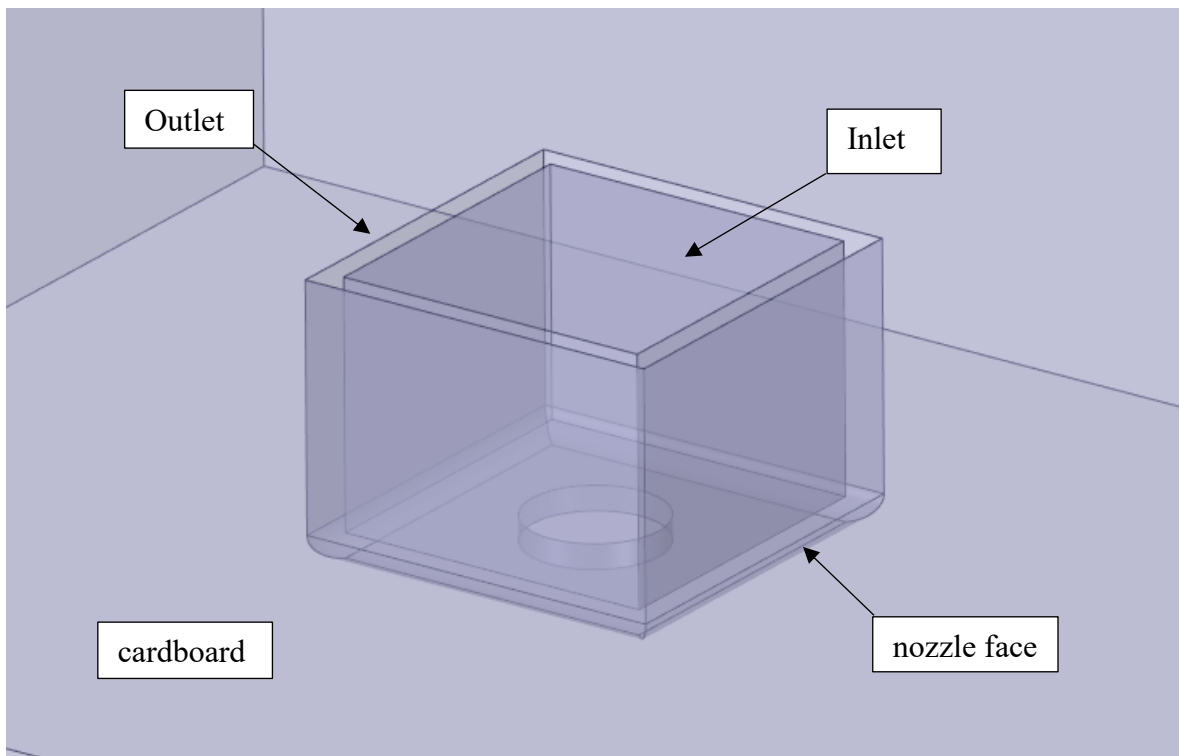
$$\alpha = \frac{q}{T_{\text{wall}} - T_{\text{ref}}} \quad (19)$$

jossa q on ohjelman laskema lämpövuoto $[\text{W}/\text{m}^2]$, T_{ref} on referenssilämpötila $[\text{K}]$ ja T_{wall} on seinämän lämpötila $[\text{K}]$.

Referenssilämpötilaksi asetettiin 473 K ($200 \text{ }^\circ\text{C}$) ja muut referenssiarvot pidettiin vakiona. Turbulenssimallina käytettiin $k-\omega$ SST-mallia. Virtaavan fluidi oletettiin kokoonpuristumattomaksi ilmaksi vakiolämpöarvolla $1015,127 \text{ J}/\text{kg}\cdot\text{K}$. Ilman lämmönjohtavuus ja viskositeetti annettiin polynomisovitteilla, jotta ne vastaisivat analyysisessä laskennassa käytettyjä tarkkoja arvoja. Aiemmin hilanluonnissa nimetyille massavirta-aukulle määriteltiin massavirran suuruus ja lämpötila. Ulostuloaukkojen reunaehtona pidettiin mittaripaine nollassa ja takaisinvirtaus estettiin laskennan nopeuttamisen vuoksi, mutta todellisuudessa suutinten leijutuspainetta voidaan säätää poistoilmapuhaltimen teholla, jolloin mittaripaine eroaa nollasta. Rainan lämpötila oletettiin tasaiseksi ja vakioksi, arvoltaan 343 K ($70 \text{ }^\circ\text{C}$) ja raina asetettiin ensimmäistä laskentaa varten paikallaan olevaksi, mutta myöhemmissä laskennoissa simuloitiin todellisuutta vastaavaa rainan liikettä koordinaatiston y -suunnassa. Suuttimen muille seinämille annettiin no-slip- ja nollaturbulenssiehdot. Laskentametoodeiksi määriteltiin vuotyypiksi Rhie-Chow: momentum based ja painediskretoinniksi PRESTO! -asetus. Muut arvot pidettiin vakiona. Rainaa vastaavalle pinnalle luotiin Iso-Clip-leikkauspinnat, joiden avulla voitiin kuvata haluttujen suureiden keskiarvoja rainan kulkusuunnassa, joka vastasi koordinaatiston y -suuntaa. Leikkauspintoja luotiin 20–30 riippuen suuttimen leveydestä niin, että ensimmäinen pinta alkoi virtauskentän päädyssä ja päättyi kehyksen vastakkaiseen pätyyn niin, että keskimmäisten pintojen väli oli suuttimen keskilinjalla. Näin voitiin olettaa lämmönsiirtokertoimien ja paineiden olevan symmetrisiä suuttimen keskilinjan molemmin puolin staattisissa tilanteissa. Leikkauspintojen materiaaliksi määriteltiin Fluentin materiaalikirjastosta vakiona löytyvä alumiini, joka on myös Alfasimulaattorin vastapinnan materiaali.

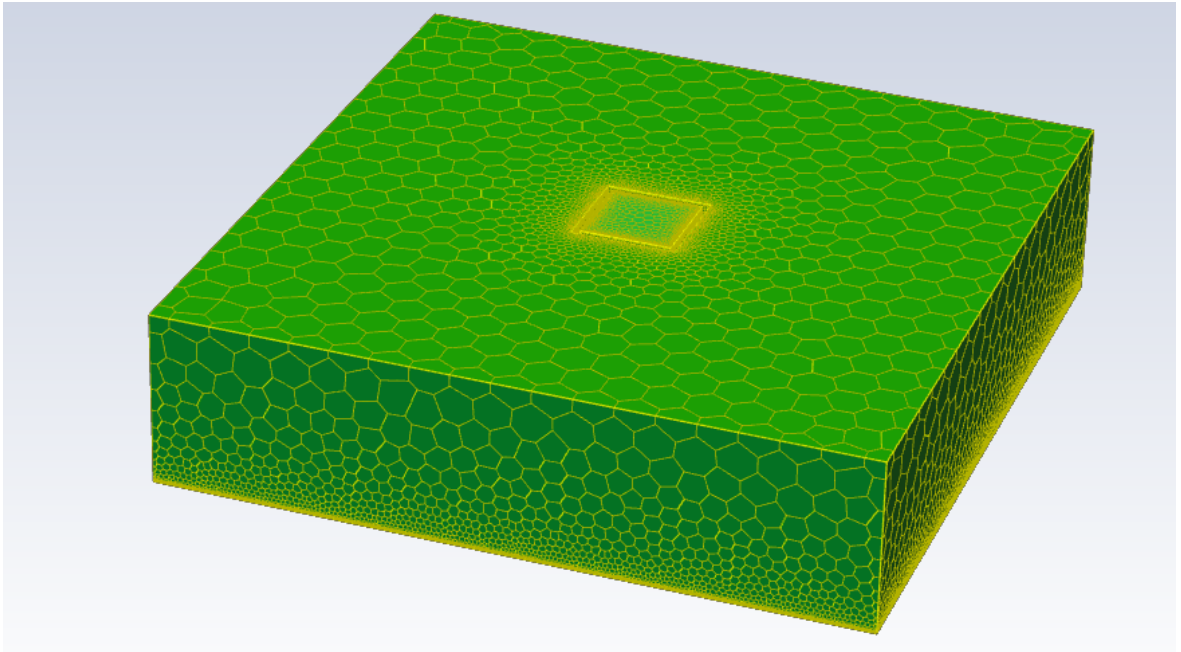
Lopuksi ennen laskennan aloittamista määriteltiin laskentaohjelma kirjaamaan raportti leikkauspintojen keskimääräisistä lämmönsiirtokertoimista iteroinneittain, ja piirtämään kuvaajat lämmönsiirtokertoimien ja y^+ -arvojen kehittymisestä, jotta tulosten konvergenssi voitiin varmistaa. Näitä y^+ -arvoja tutkittiin rainasta, suutinpinnasta ja seinämäryhmästä ja tavoitearvoina olivat lukemat <1 rainapinnalle ja <5 suutinpinnalle ja seinämälle.

Lisäksi mallinnettiin myös yhden reiän suutin (kuva 18), jotta voitiin helposti verrata numeerisen laskennan tuloksia analyyttiseen ratkaisuun, ja samaa mallia voitiin myös hyödyntää tehokkaasti virtauksen kuristuman numeeriseen tutkimiseen.



Kuva 18. Yhden reiän suuttimen mallinnettu virtauskenttä

Yhden reiän suuttimen laskennassa käytettiin vastaavanlaisia ratkaisasetuksia kuin varsinnaisten suuttimien laskennassa, kuitenkin ilman periodisia reunaehtoja, sillä ne eivät olleet laskennan kannalta olennaisia.



Kuva 19. Yhden reiän suuttimen laskentahila

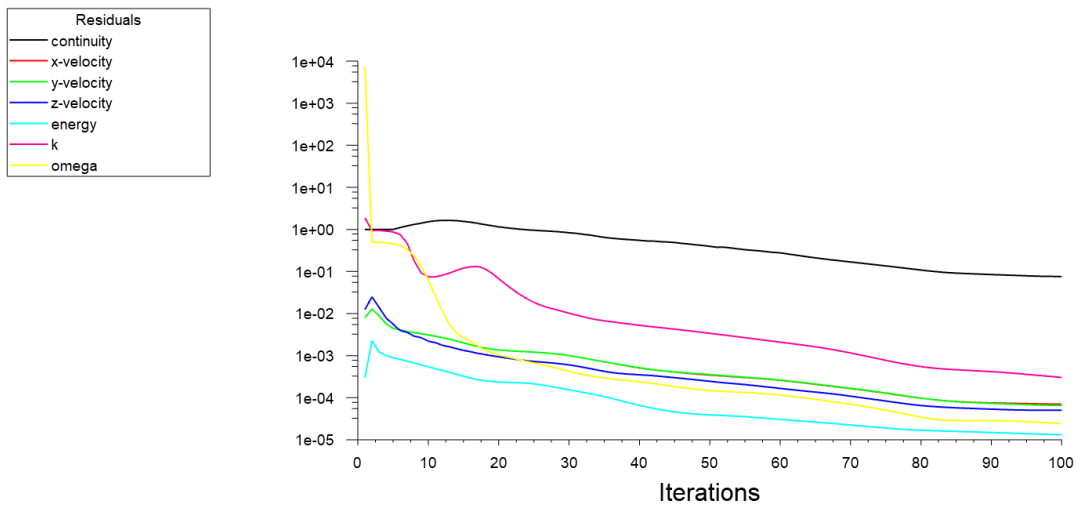
Laskentahila (kuva 19) olisi voitu toteuttaa hyödyntämällä symmetriaa, sillä laskennassa käytetty yhden reiän suutingeometria olisi mahdollistanut mallin jakamisen neljännekseen, mutta laskenta-aika näin yksinkertaiselle geometrialle ei ollut merkittävä tekijä. Lisäksi symmetriaa hyödynnettäessä tulosten jälkikäsittely vaatii lisätoimenpiteitä.

4 Tulokset ja niiden analysointi

Yhden reiän suuttimen laskentahilaa hyödynnettiin laskenta-asetusten verifiointiin, ja samoilla hila-asetuksilla toteutettiin myös varsinaisen suuttimen laskenta. Luvussa esitetään laskennan asetukset tapauksittain ja laskentojen tuottamat tulokset.

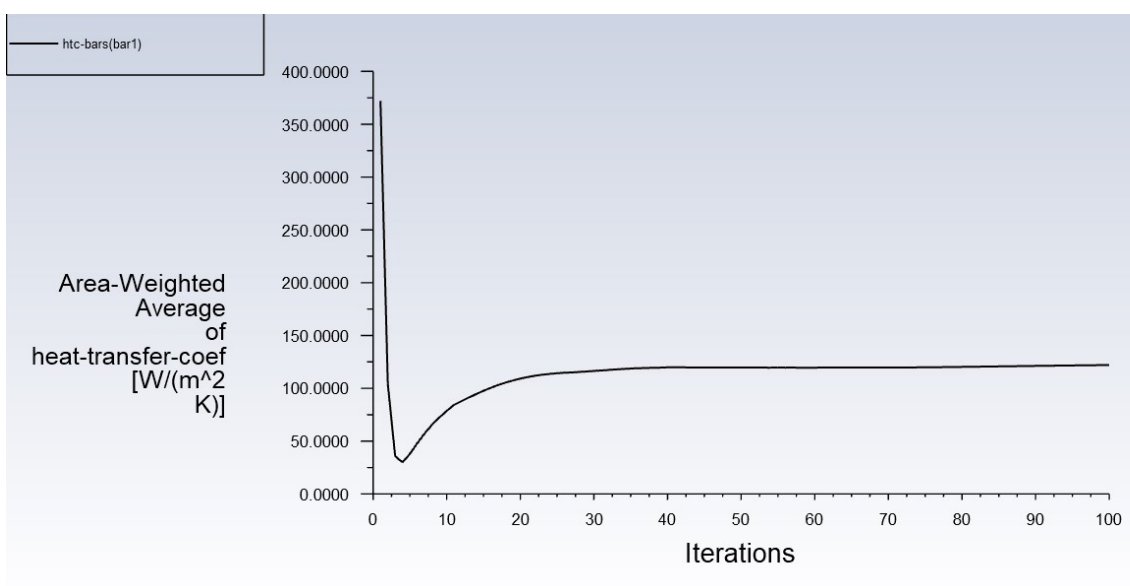
4.1 Laskenta-asetusten verifiointi

Simuloinnissa käytettiin 50 m/s puhallusnopeutta ja 5,6 mm halkaisijaltaan olevaa teräväreunaista reikää 14 mm puhallusetäisyydellä. Massavirta haluttua puhallusnopeutta varten laskettiin ensin kirjallisuudesta löytyvällä 0,611 kuroumakertoimella, jonka avulla simuloinnin tuloksista saatiin kaavaa 12 hyödyntäen, uusi tarkka kuroumakerroin, arvoltaan 0,654 (Lienhard 1984, 1). Kun tarkka kerroin oli tiedossa, voitiin massavirran suuruus laskea halutun puhallusnopeuden saavuttamiseksi soveltamalla kaavaa 12. Simulaatio suoritettiin sadalla iteraatiolla ja huomattiin, että muut residuaalit konvergoituvat noin 90 iteraation kohdalla, kuten nähdään kuvasta 20, mutta jatkuvuuden residuaali jäi arvoltaan korkeaksi. Tämä tarkoittaa, että todellinen ratkaisu jää oskilloimaan maksimiarvojen ja minimiarvojen välillä. Ratkaisun tulos on näin ollen epästabiili. Toisaalta epästabiili virtauskenttä on myös todellinen puhalluksen vastapinnalla.



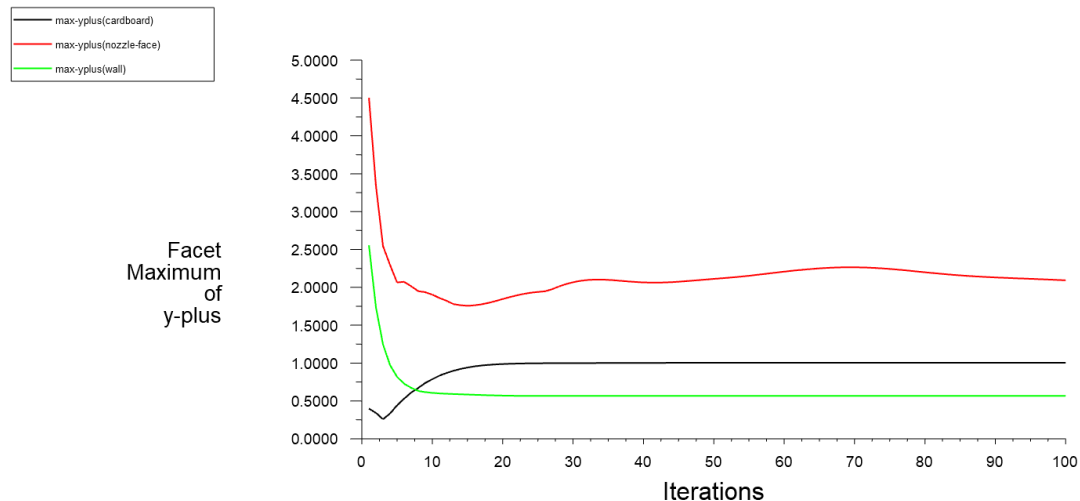
Kuva 20. Residuaalien kehittyminen iteroinneittain

Keskimääräisen lämmönsiirtokertoimen kehittymistä koko virtauskentän vastapinnan alueelta seurattiin myös iteroinneittain, ja havaittiin että konvergenssi saavutettiin noin 40 iteraation kohdalla (kuva 21). Kuvasta nähdään myös, ettei lämmönsiirtokertoimen arvon oskillointi iteroinneittain ole merkittävää korkeasta jatkuvuuden residuaalin arvosta huolimatta, joten keskiarvoisen tuloksen voidaan todeta olevan riittävän luotettava. Tämän lisäksi voidaan olettaa, ettei tulos muutu enää lisäämällä iteraatioiden määrää.



Kuva 21. Lämmönsiirtokertoimen kehittyminen iteroinneittain

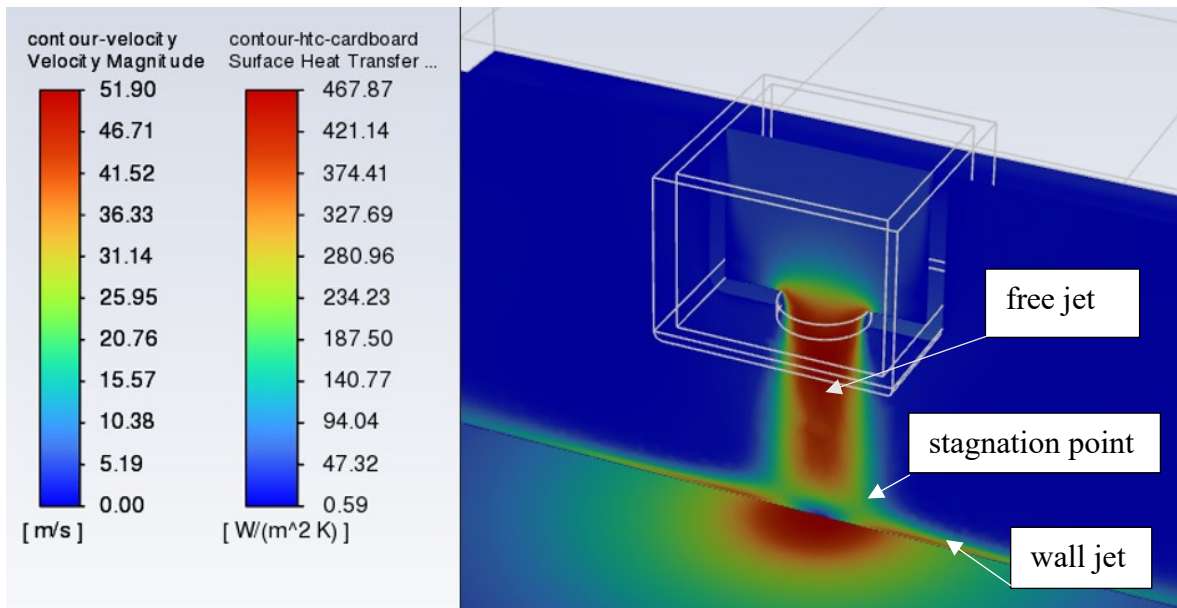
Residuaalien konvergenssin lisäksi tarkistettiin, että y^+ -arvot rainalle, suutinpinnalle ja seinämälle. Konvergenssi saavutettiin noin 40 iteraation kohdalla (kuva 22) ja arvot olivat tavoitearvojen sisällä.



Kuva 22. y^+ -arvojen kehittyminen iteroinneittain

Näiden lisäksi tarkasteltiin massa- ja lämmönsiirtotaseiden arvoja. Massatase tulo- ja poistoaukoille jäivät alle 1 %, mutta vastapinnan lämmönsiirtotaseen arvo oli huomattavan korkea, arvoltaan 7,8 %.

Laskennan jälkikäsittelyssä asetettiin myös Fluentin Contour Plot -ominaisuudella näkyviin lämmönsiirtokertoimen jakauma rainan pinnalla ja virtauksen nopeusprofiili kohtisuoraan suutinpintaa nähden (kuva 23). Suutinreiästä ulospurkautuvan virtauksen profiili vastaa kuvassa 10 esitettyä teoreettista virtausprofiilia ja sen eri alueet ovat selvästi havaittavissa. Tämän lisäksi suutinkammion sisälle asetettiin Iso-Clip-leikkauspinta, josta voitiin laskea keskimääräinen suutinkammion staattinen paine. Tulokseksi staattiselle paineelle saatiin 965 Pa. Virtauksen nopeus vastasi suutinkammion mitatun paineen ja 200 °C ilman tiheyden avulla, kaavalla 12 laskettua puhallusnopeutta. Puhallusnopeuden havaitaan myös olevan kaikkialla virtauskentän sisällä alle $M = 0,3$, jolloin voidaan todeta kokoonpuristumattoman virtauksen olevan validi asetukset mallissa.

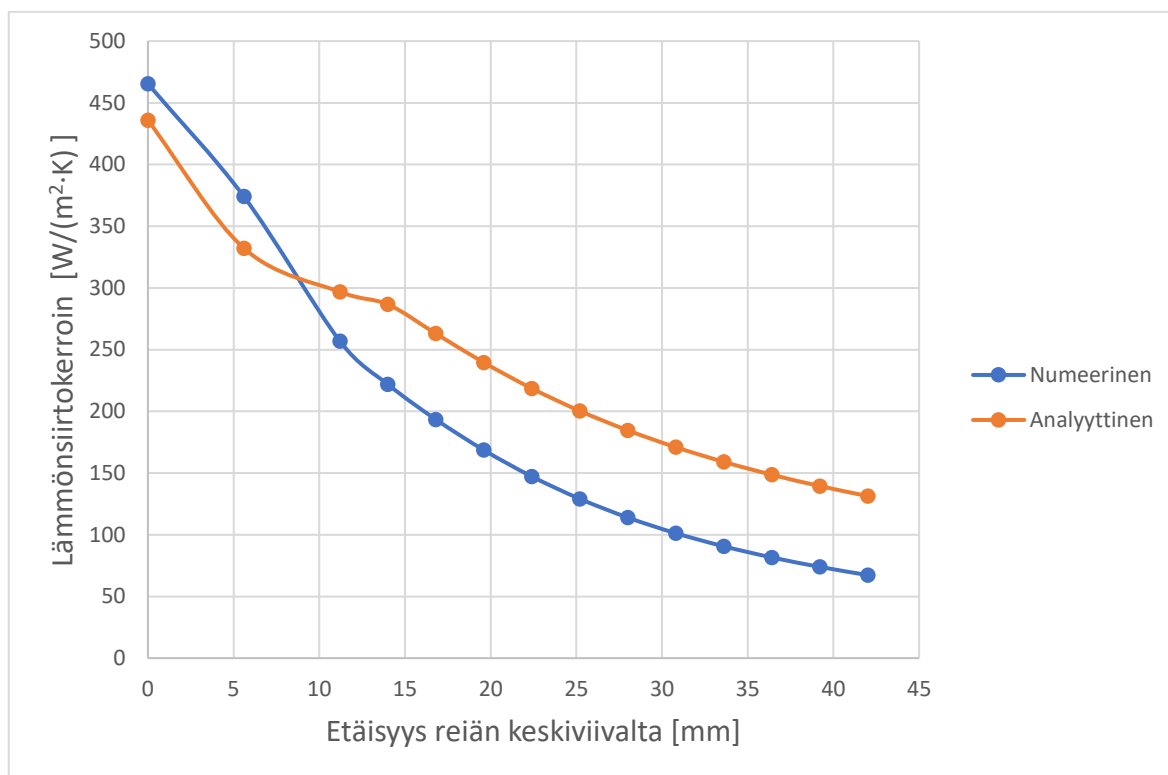


Kuva 23. Paikallinen lämmönsiirtokerroin ja virtauksen nopeusprofiili

Tulosten jälkikäsitelyssä poimittiin rainaa vastaavalta pinnalta keskimääräisiä lämmönsiirtokerrointen arvoja radiaalisuunnassa, joista luotiin kuvaaja etäisyyden funktiona (kuva 24). Dataa verrattiin analyttiseen ratkaisuun, joka laskettiin kaavalla 9. Molemmissa ratkaisuissa laskettiin paikallinen lämmönsiirtokerroin 14 eri radiaalisessa etäisyydessä pois päin virtauksen keskilinjasta. Analyttisen ratkaisun parametrit olivat taulukon 1 mukaiset.

Taulukko 1. Yhden reiän analyttisen ratkaisun parametrit

Puhallusilman lämpötila	200 °C
Vastapinnan lämpötila	70 °C
Puhallusilman nopeus	50 m/s
Reiän halkaisija	5,6 mm
Puhallusetäisyys	14 mm
Suutinlevyn ainevahvuus	1 mm



Kuva 24. Numeerisen ja analyttisen ratkaisujen lämmönsiirtokerroimen vertailu

Kuvan 24 kuvaajasta nähdään, kuinka molempien ratkaisujen tuloksissa lämmönsiirtokerroin pienenee mentäessä pois päin virtaussuihkun keskilinjalta, joka onkin odotettavissa. Tuloksia vertailemalla huomataan selvä yhtenäisyys ratkaisujen kulmakertoimien välillä, mutta kuitenkin virtauksen keskilinjalta kauemmas mentäessä lämmönsiirtokerroimen arvoissa on noin $70 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ eroavaisuus. Toisaalta Mujumdarin (2015, 378) tutkimuksen mukaan Martinin analyttinen ratkaisu yhden reiän suuttimelle on luotettava vain $100 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloihin asti ja lisäksi välillä $600 \text{ }^\circ\text{C}$ – $700 \text{ }^\circ\text{C}$. Tutkimuksen mukaan vastaavaa paikallisen lämmönsiirtokerroimen eriytymistä on havaittu aiemminkin.

Edellä mainittu laskenta toteutettiin myös 400 lisäiteraatiolla, mutta residuaalit ja lämmönsiirtokerroin pysyivät samalla tasolla. Sama laskenta ajettiin myös k - ϵ RNG-turbulenssimallilla, jotta voitiin varmistaa turbulenssimallin vaikutus laskennan tuloksiin. Lisäasetukseksi mallille asetettiin ”enhanced wall treatment”-ominaisuus. Tämän lisäksi vastaava laskenta suoritettiin kahdelle tiheämmälle hilalle, joiden yksikkökoppien määrät, rajakerrokset ja turbulenssimalli ovat esitetty taulukossa 2. Taulukossa esitetty koenumero 2 on toteutettu aiemmin kuvaillun koenumero 1:n laskentahilalla, mutta k - ϵ RNG-turbulenssimallilla.

Taulukko 2. Laskenta useammalle tapaukselle

Koenumero	Yksikkökoppien määrä	Rajakerrosten määrä (vastapinta ja seinämä)	Turbulenssimalli	Keskimääräinen lämmönsiirtokerroin [$W/(m^2 \cdot K)$]
1	713048	10 + 10	k- ω SST	67,31
2	713048	10 + 10	k- ϵ RNG	60,43
3	1246765	20 + 15	k- ω SST	68,32
4	5612408	25 + 20	k- ω SST	68,98

Tiheämpi laskentahila antoi huomattavasti matalammat y^+ -arvot, mutta kuten laskennan tuloksista (Taulukko 2) voitiin todeta, ettei se vaikuttanut merkittävästi paikalliseen lämmönsiirtokertoimeen, mutta lisäsi laskenta-aikaa huomattavasti. Residuaalit vastasivat myös kuvan 20 arvoja, tulo- ja poistoaukkojen massataseet olivat alle 1 % ja lämmönsiirtotase 6 %. Lisäksi huomataan, että k- ϵ RNG-turbulenssimalli antaa alhaisemman keskimääräisen lämmönsiirtokertoimen, kuin k- ω SST-malli, ja on myös tuloksista eniten poikkeava verrattuna analyttiseen ratkaisuun. Näistä tuloksista voidaan vetää johtopäätös, että ensimmäisen kokeen laskentahilatiheys ja ratkaisijan asetukset ovat riittäviä varsinaisten suutinten virtausten ja lämmönsiirron laskentaan. Tulokset ovat luotettavia, sillä ne poikkeavat hyvin vähän keskenään. Huomattavasti raskaamman laskentamallin käyttö ei siis ole tässä tapauksessa perusteltua. Näitä ratkaisuasetuksia hyödynnettiin jokaisessa tulevassa laskennassa, ja ainoastaan virtauksen lämpötilaa ja massavirtaa varioitiin.

4.2 Virtauksen kuristuma ja lämpösäteily

Seuraavaksi tutkittiin virtauksen kuristumaa varioimalla reikägeometriaa taulukon 3 mukaisesti. Jokaisesta tapauksesta luotiin uusi laskentahila aiemmin esitellyllä taulukon 2 koenumero 1:n hila-asetuksilla. Puhallusilman lämpötila ja nopeus pidettiin vakiona.

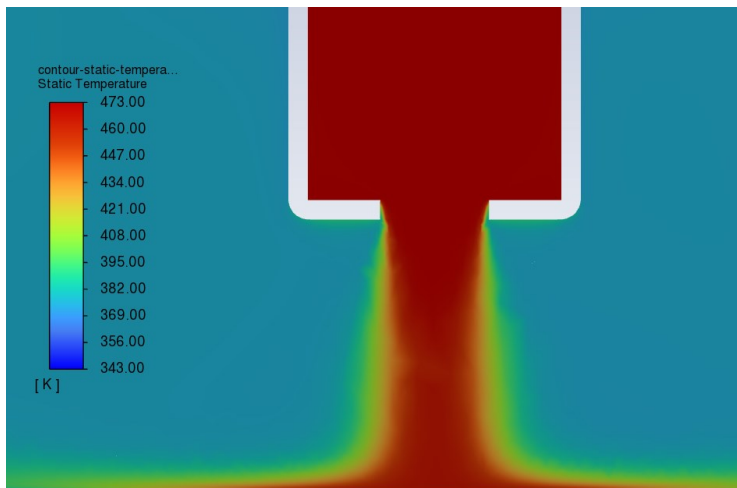
Taulukko 3. Numeerisen laskennan antamat kuromakertoimet

	$d/s = 5,6$	$\varepsilon = 0,654$
	$d/s = 5,6$	$\varepsilon = 0,815$
	$d/s = 5,6$	$\varepsilon = 0,779$
	$d/s = 2,8$	$\varepsilon = 0,665$
	$d/s = 2,8$	$\varepsilon = 0,804$
	$d/s = 1,67$	$\varepsilon = 0,661$
	$d/s = 1,67$	$\varepsilon = 0,855$

Tuloksista nähdään, kuinka virtauksen kuristuma täydellisissä sylinterirei'issä pysyy käytännössä katsoen samana, riippumatta tutkituista d/s -suhteista. Kartiomaisissa rei'issä kerroin vaihtelee välillä $\varepsilon = 0,779-0,855$, ja on suurin d/s -suhteella 1,67. Sylinterimäisissä rei'issä virtaus kuroutuu reiän etureunassa, eikä levyn paksuudella näytä olevan enää merkitystä kertoimeen. Virtausprofiilin perusteella voisi muotoilla reiän, jolla kerroin olisi 1.

Pitämällä reiän d vakiona, saavutetaan pienemmillä kuroumakertoimilla suurempia puhallusnopeuksia, kun massavirta pidetään vakiona perustuen kaavaan 12, sillä suutinlevyn painehäviö on silloin suurimmillaan, jolloin myös puhaltimelta vaaditaan enemmän tehoa. Mitä suurempi kerroin on, sitä enemmän vaaditaan massavirtaa, jotta suutinkammion staattinen paine on riittävä halutun puhallusnopeuden aikaansaamiseksi. Jos taas puhallusnopeus halutaan pitää vakiona, vastaavasti suuremmilla kertoimilla vaaditaan enemmän massavirtaa, joka taas lisää energiankulutusta. Sopivalla reiän d/s -suhteella voidaan siis vaikuttaa ilma-kuivaimen energiatehokkuuteen. Ohutlevyjen lävistyksessä reiän muoto ei pysy täydellisenä sylinterinä, vaan leikkausvoimien ja materiaalin irtoamisen vuoksi se laajenee kartiomaiseksi poispäin lävistyssuunnasta (Friendship 2020). Yrityksen aiemmassa sisäisessä tutkimuksessa on myös tutkittu virtauksen kuroumakertoimia koesuuttimilla, ja ne poikkeavat tässä tutkimuksessa esitetyistä tuloksista. Tutkimuksen tuottamia geometrioita voidaan hyödyntää laskennassa, sillä puhallusnopeus voidaan säätää niiden mukaan, mutta reikäkoh- tainen massavirta on silloin todellisuudesta poikkeava. Lisäksi on havaittu, että tietyillä reikägeometrioilla virtaus viheltää voimakkaasti aiheuttaen meluhaittaa. Jotta CFD-laskennalla voitaisiin käyttää todellisuutta vastaavia massavirtoja, tulisi reiän geometria mitata valmistetusta koesuuttimesta, ja jäljitellä sen muoto laskentahilaan, tai vaihtoehtoisesti simuloida lävistyksen vaikutusta ohutlevyyn numeerisesti. CFD-laskennassa voisi myös tutkia reiän akustiikkaominaisuuksia, jotta vihellysilmiöltä välttyttäisiin.

Lisäksi samalle yhden reiän suutinmallille suoritettiin simulaatio, jossa lämpösäteily oli lisättyä malliin. Lämpösäteilyn mallinnuksessa hyödynnettiin Fluentin S2S-mallia (Surface-to-Surface). Malliin määriteltiin suutinpinnan materiaaliksi ohjelman vakiokirjastosta löytyvä teräs, ja rainapinnan materiaalina pidettiin edelleen alumiini. Puhallusilman ja rainapinnan lämpötilat ja puhallusnopeus pidettiin samana. Simulaation jälkikäsitelyssä tuloksista mitattiin suutinpinnan lämpötila, jotta tulosta voitiin verrata kaavan 15 analyttiseen ratkaisuun. Lämpötilaksi pinnalle saatiin 387 K (kuva 25).



Kuva 25. Lämpösäteilyn vaikutus lämmönsiirtokertoimeen

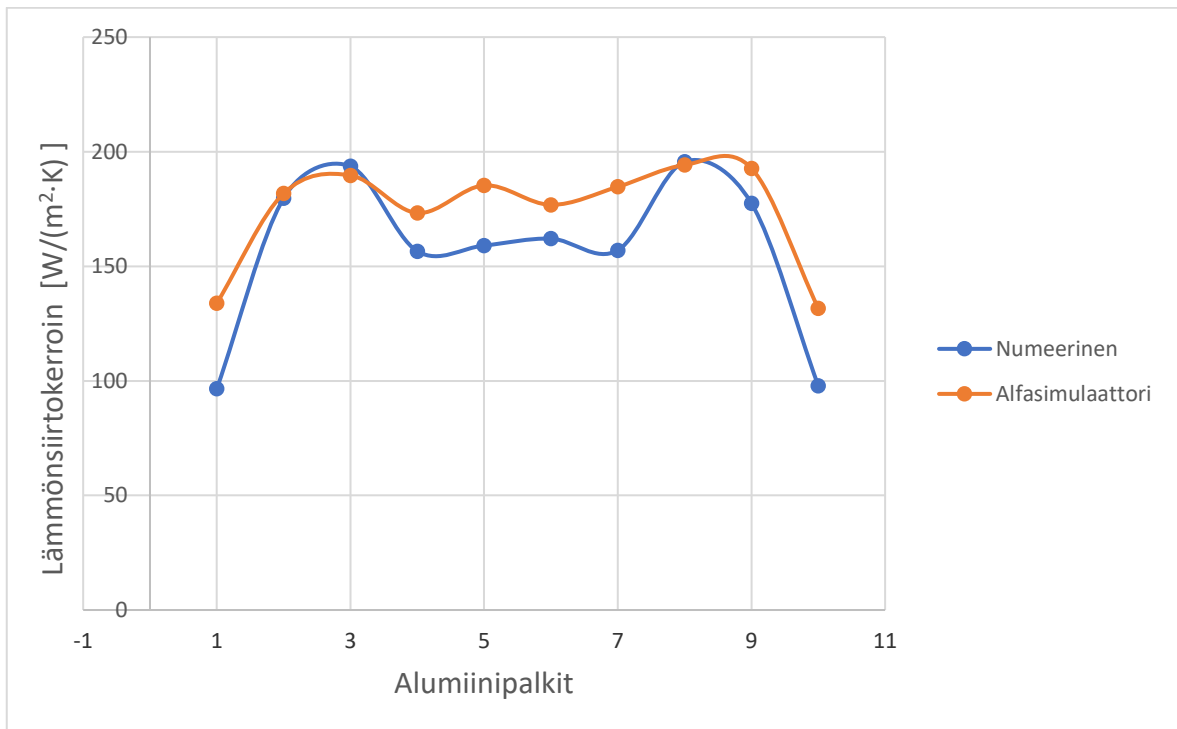
Lämpösäteilyn tuottama lisä lämmönsiirtokertoimeen laskettiin alkuperäisen laskennan tulosten ja mallin, johon säteilyvaikutus oli lisätty, tulosten erotuksella. Tulokset analyyttisen ja numeerisen ratkaisun välillä olivat yhteneviä. Numeerisen laskennan tulos oli $2,89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ja analyyttisen $2,997 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Analyyttisen ratkaisun parametrit olivat taulukon 4 mukaiset. Kuten Heikkilän (1993, 101) tutkimustuloksista myös voidaan tulkita, ei vastaavilla materiaaleilla tapahtuva säteilyn tuoma lisä kokonaiskeskiarvolliseen lämmönsiirtokertoimeen ole kovinkaan merkittävä, kun kyseessä on teräs suutinpinnan materiaalina. Tämä voidaan toki lisätä numeeriseen virtauslaskentamalliin, mutta sen vaikutuksen vähäisyyden suhde laskenta-ajan kasvamiseen ei ole välttämättä perusteltua. Ilmiön olemassaolon tiedostaminen on kuitenkin olennaista, etenkin kun verrataan numeerisen ratkaisun tuloksia Alfasimulaattorilla tehtyihin koetuloksiin, jossa myös alumiinipalkkien kesken tapahtuu lämpösäteilylämmönsiirtoa.

Taulukko 4. Lämpösäteilyn lämmönsiirtokertoimen analyyttisen ratkaisun parametrit

Puhallusilman lämpötila	200 °C
Vastapinnan lämpötila	70 °C
Suutinpinnan lämpötila	150 °C
Suutinpinnan emissiivisyys	0,8
Vastapinnan absorboivuus	0,3

4.3 Suutinsimuloinnit

Varsinaisen suuttimen CFD-laskennassa käytettiin samoja hilanluontiasetuksia, kuin yhden reiän suuttimen ensimmäisessä laskennassa, sillä lämmönsiirtokertoimen kehittyminen ei poikennut merkittävästi tiheämmän hilan tuloksista. Numeerisen virtauslaskennan tuloksia verrattiin aiemmin Alfasimulaattorilla toteutettuihin vastaavan suuttimen kokeellisen tutkimuksen tuloksiin. Numeerisessa menetelmässä mitattiin lämmönsiirtokerrointa koejärjestyitä vastaavalla tavalla, eli käyttämällä sama määrä leikkauspintoja, kuin simulaattorissa oli alumiinipalkkeja. Myös pintojen leveys vastasi palkkien leveyttä. Molempien menetelmien parametrit olivat taulukon 1 mukaiset. Lämpötilan kehittymistä on mitattu simulaattorissa noin 200 sekunnin ajalta. Mittauksen alusta on poistettu noin 40 sekuntia, jolloin lämmönsiirron analyysin kesto aika on noin 150 sekuntia. Kokeellisen menetelmän tarkempi toimintaperiaate on esitelty luvussa 1.2. Varsinaisen suuttimen mallinnuksessa käytettiin teräväreunaista, täydellisen sylinterin muotoista reikää, sillä sen kuristumakerroin oli lähimpänä kokeellisesti tutkitun vastaavan suuttimen kerrointa, joka oli 0,6.

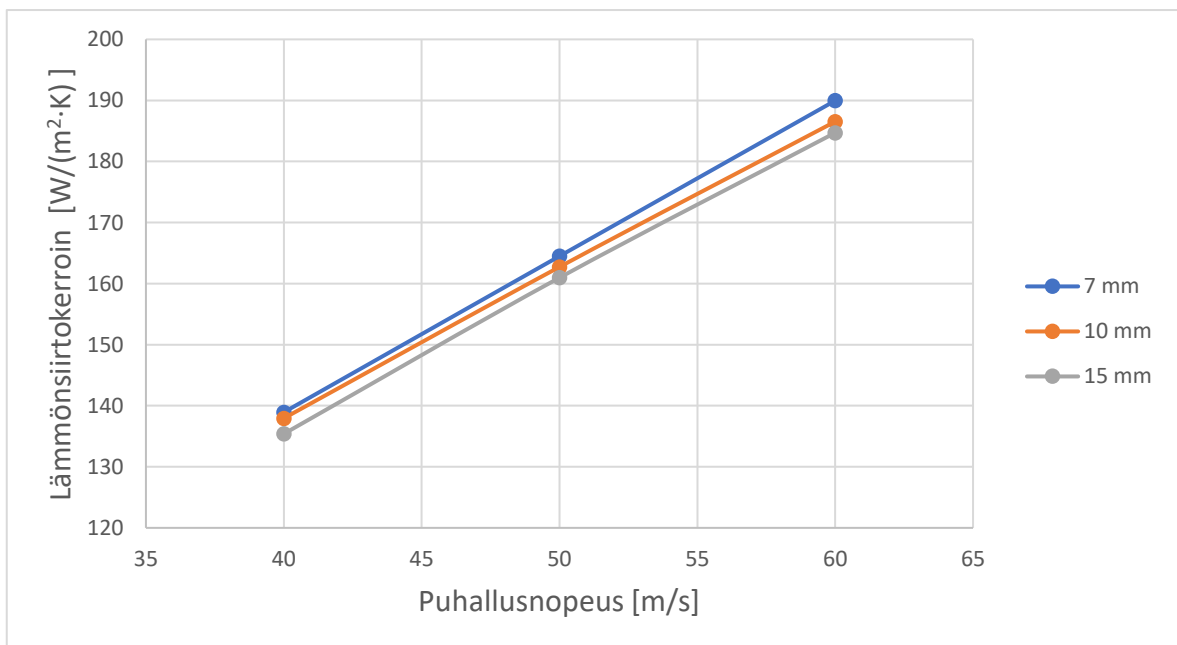


Kuva 26. Lämmönsiirtokerroimien vertailu

Kuten nähdään kuvasta 26, numeerisen ratkaisun kuvaaja vastaa muodoltaan kokeellisen menetelmän tuloksia, mutta numeerisen menetelmän arvot jäävät kokeellisen menetelmän arvojen alle keskimäärin noin 10 % suuruudella. Tämä johtunee siitä, että Alfasimulaattori mittaa todellisuudessa lämmön siirtymistä ensin konvektiolla ja sitten johtumalla alumiinipalkkeissa. Alumiinipalkkien lämpötila oletetaan tasaisesti jakautuneeksi, jolloin alumiinipalkkien lämpötilan noususta ja lämpökapasiteetista voidaan laskea siirtyneen lämmön määrä aikayksikössä. Siirtyneen lämmön määrästä voidaan tasaisen lämpötilaoletuksen perusteella laskea lämmönsiirtokerroin puhallusilmasta alumiinipalkkeihin. Lämmönsiirtokerroin on suurimmillaan pistemäisissä kohdissa, jotka ovat suoraan suuttimen reikien alla, joten alumiinipalkin lämpötila ei ole todellisuudessa tasainen, vaan lämpöä siirtyy pistemäisistä kohdista palkin muihin kohtiin ja siten kuumien kohtien lämpötila on alempi kuin on oletettu ja lämpötilaero puhallusilmaan suurempi. Ilmiö lisää konvektiolämmönsiirtoa ja siten lämmönsiirtokerrointa. Lisäksi palkeista säteilee ja johtuu ilma- ja ilmarakenteissa lämpöä viereisiin palkkeihin. Lämpötilaerojen vuoksi lämpöä siirtyy enemmän, jolloin myös kerroin kasvaa noudattaen kaavoja 6 ja 7. Tämän todentamiseen tulisi laskea tilanne numeerisesti myös niin, että alumiinipalkkien sisäinen lämmönjohtuminen ja niiden keskinäinen lämpösäteily olisi huomioitu laskentamallissa. Toisaalta paperi- tai kartonkirataa vasten puhaltaessa tätä

ilmiötä ei tapahdu, joten voidaan olettaa, että CFD-laskenta antaa luotettavamman tuloksen, kun vertailukohteenä on päällystetyn rainan kuivautus. Toisaalta täydellisessä numeerisessa virtauslaskentamallissa tulisi myös huomioida päällysteen pinnalta haihtuvan veden ja nesteen imeytymisen vaikutus lämmönsiirtoon. Toinen huomion arvoinen seikka on myös se, että molemmissa menetelmissä puhallusnopeus on pidetty vakiona, mutta todellisuudessa virtausten kuristumat menetelmien kesken ovat lievästi poikkeavat. Koesuuttimen reiän muoto ei ole todellisuudessa täydellinen sylinterimäinen reikä, kuten se on tässä tutkimuksessa käytetyn numeerisen menetelmän laskentahilassa. Tämä johtaa siihen, että myös massavirran suuruudessa on lievä ero, mutta toisaalta vain puhallusnopeus ja lämpötila vaikuttavat lämmönsiirtokerroimeen.

Vastaava simulointi toteutettiin kolmella eri puhallusnopeudella, jotka olivat aiemman 50 m/s nopeuden lisäksi 40 m/s ja 60 m/s, ja lisäksi kolmella eri puhallusetäisyydellä, jotka olivat 7 mm:n lisäksi 10 mm ja 15 mm. Tulokset koottiin yhteen kuvaajaan, jossa oli esitetty keskimääräiset lämmönsiirtokerroimet puhallusnopeuksien funktiona (kuva 27).



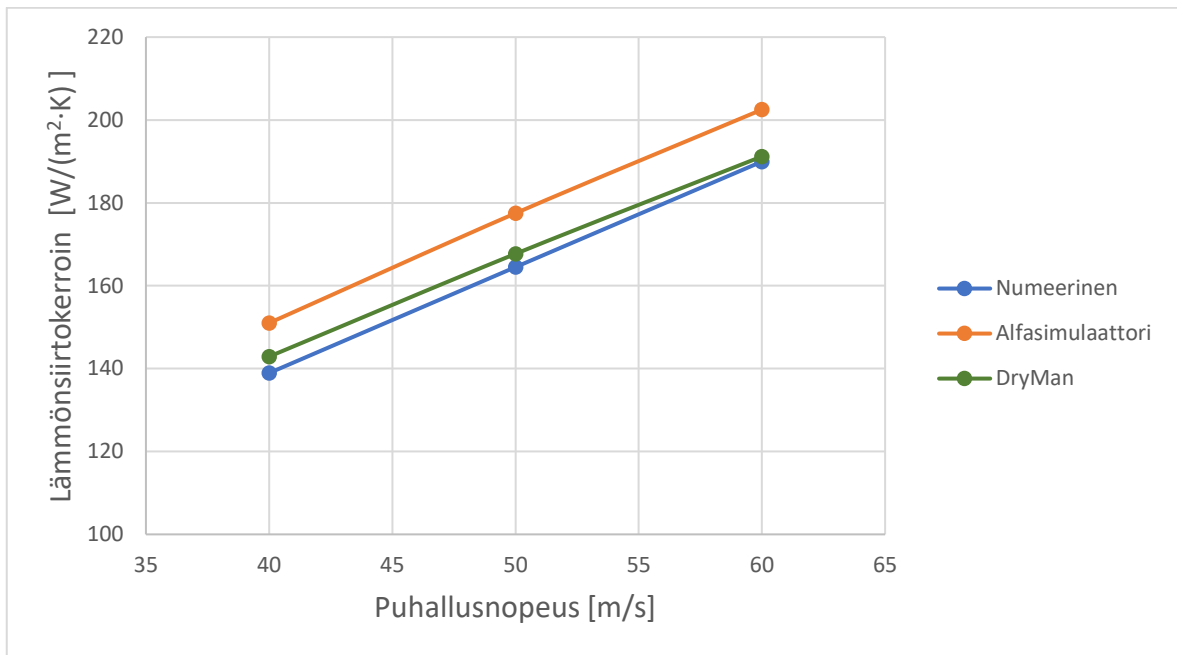
Kuva 27. Lämmönsiirtokerroin puhallusnopeuden funktiona

Keskimääräinen lämmönsiirtokerroin nousi lineaarisesti jokaisella puhallusetäisyydellä puhallusnopeuden kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että kaavan 9 mukaisesti Reynoldsin luku

kasvaa myös puhallusnopeuden kasvaessa. Kaavaa 12 tutkimalla huomataan, että suurempi suutinkammion staattinen paine on edellytyksenä suuremmalle puhallusnopeudelle, ja tämä saavutetaan ainoastaan lisäämällä sisääntuloaukon massavirtaa, eli myös kiertoilmapuhaltimen energiankulutus kasvaa. Virtausnopeuden kasvattaminen kasvattaa myös virtauksen Reynoldsin lukua, eli virtaus muuttuu turbulenttisemmaksi. Turbulenttinen virtaus sekoittaa fluideja tehokkaammin, jolloin myös lämmönsiirto tehostuu. Reynoldsin luvun kasvun yhteydessä kasvaa myös Nusseltin luku, joka kuvaa pinnan konvektiolämmönsiirtymistä suhteessa konduktiolämmönsiirtymiseen. (Andersson 2012, 86). Lisäksi havaittiin, että puhallusetäisyyden kasvattaminen alensi lämmönsiirtokerrointa jokaisessa puhallusnopeudessa. Tämä on seurausta siitä, että virtausnopeus on suurimmillaan kohdassa, jossa ilma purkautuu ulos suuttimen reiästä, ja se heikkenee merkittävästi etäisyyden kasvaessa. Kuten aiemmin jo todettiin, virtauksen turbulenssilla on lämmönsiirtoa tehostava vaikutus, joten on loogista, että lämmönsiirtokerroin alenee puhallusetäisyyden kasvaessa. Optimaalinen puhallusetäisyys vaihtelee kolmen eri kuivaintyyppin kesken, jotka ovat yksipuoleinen leijutuskuivain, kaksipuoleinen leijutuskuivain ja päällepuhalluskuivain, jonka vuoksi sen vaikutusten tunteminen on olennaista.

Näiden kolmen parametrin arvojen keskinäinen säätö on avaintekijä optimaalisimman paperin tai kartongin kuivauksen kannalta, kun kuivatukseen käytetään puhallussuuttimilla varustettua ilma-kuivainta. Esimerkiksi puhallusnopeuden kasvattamista paremman lämmönsiirron saavuttamiseksi on siis harkittava, sillä suuren nopeuden aiheuttamat voimat voivat heikentää radan ajettavuutta muun muassa radan lepattamisen muodossa ja massavirran kasvattaminen vaatii enemmän energiaa kiertoilmapuhaltimelta. Myös liian pieni puhallusetäisyys johtaa siihen, että ilmavirtaus kimpoaa vastapinnalta heikentäen kerrointa. Lisäksi ilman kokoonpuristumaton ominaisuus katoaa pikkuhiljaa, kun Machin luku ylittää arvon 0,3, ja tällä voi olla vaikutusta painehäviön suurentumiseen. Radan ajettavuutta ei voida mallintaa numeerisesti CFD-laskennalla, mutta toisaalta ei myöskään kokeellisesti Alfasimulaattorilla. Tämän huomiointiin vaaditaan koemenetelmää, jossa vastapinnan liike on huomioitu, tai vaihtoehtoisesti empiirisiin tutkimuksiin perustuvia analyttisiä menetelmiä.

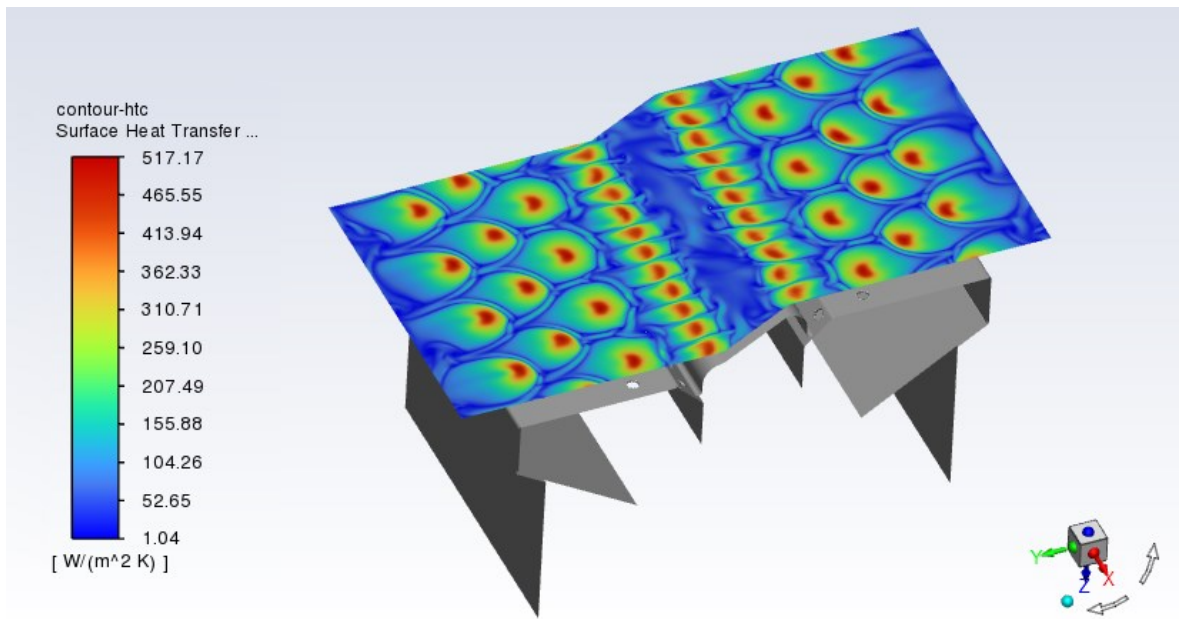
Seuraavaksi verrattiin keskenään numeerisen ja kokeellisen menetelmän tuloksia sekä yrityksen käytössä olevan DryMan-simulointiohjelman tuloksia. Ohjelman tarkempi kuvaus on esitetty luvussa 1.4. Jokaisessa menetelmässä oli käytössä taulukon 1 parametrit.



Kuva 28. Vertailu lämmönsiirtokerroimesta puhallusnopeuden funktiona

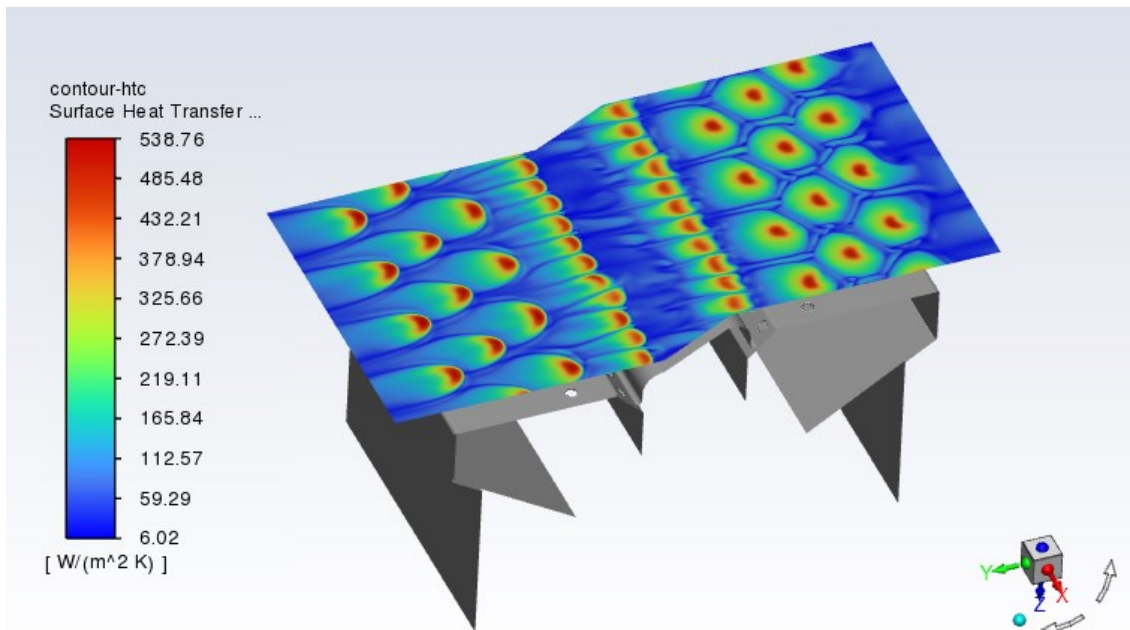
Kuvan 28 tuloksista nähdään kuinka numeerisen ratkaisun tulokset ja DryMan-mallin tulokset vastaavat käytännössä toisiaan, ja molempien antamat keskimääräiset lämmönsiirtokerroimet ovat Alfasimulaattorin tuloksia matalampia. Haihdutusta ei ole huomioitu DryMan-simuloinnissa, jolloin se vastaa paremmin numeerisen ratkaisun ja kokeellisen menetelmän asetelmia. Aiemmin perusteltiin jo Alfasimulaattorin eroavaisuutta numeerisen laskennan tuloksiin, joten kahden tutkimustuloksen vastaavuudet vahvistavat tässä tutkimuksessa toteutetun numeerisen laskennan tulosten validiteettia.

Jokaisessa numeerisessa mittauksessa tutkittiin myös lämmönsiirtokerrointa vastapinnalla visuaalisesti luomalla Contour-plotit lämmönsiirtokerroimista rainapinnoille (kuva 29). Suutinten seinämähilat lisättiin samaan näkymään helpottamaan geometrian vaikutuksen tutkimista.



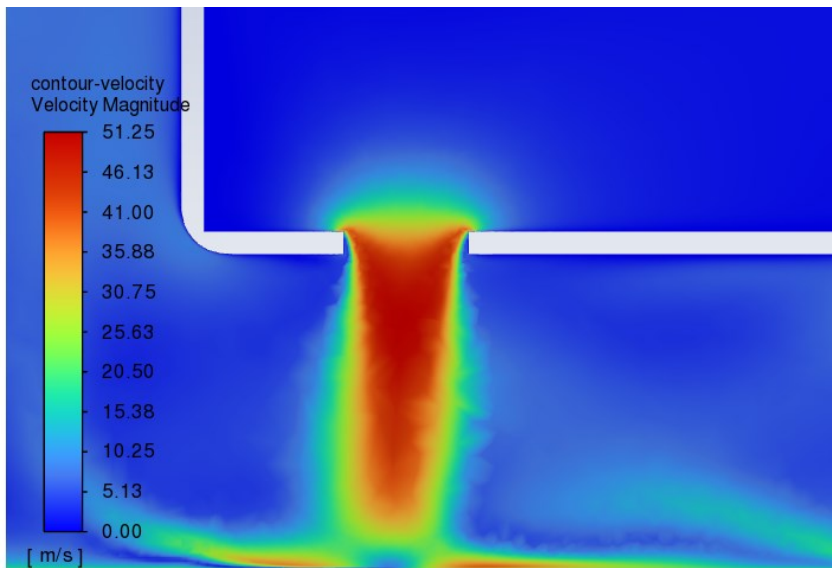
Kuva 29. Lämmönsiirtokerroimen jakautuminen vastapinnalle, staattinen tilanne

Kuvasta 29 nähdään, kuinka vastapinnan staattisessa tilanteessa lämmönsiirtokerroimen käyttäytyminen on symmetrinen suuttimen keskilinjan x-koordinaatin suhteen. Myös mitattaessa tulo- ja jättopuolen keskimääräiset lämmönsiirtokerroimet, päästään tismalleen samaan tulokseen. Suuttimen rei'istä purkautuvat yksittäiset suihkut näkyvät punaisina pisteinä kohtina juuri reikien kohdalla, ja vasemmalla puolella olevasta kertoimen skaalasta nähdään, että lämmönsiirtokerroin on suurimmillaan juuri näissä kohdissa. Yksittäisten suihkujen seinämävirtaukset törmäävät toisiinsa luoden turbulenttisia alueita, ja jäähtynyt ilma kulkee niiden välissä kohti ulostuloja. Tilanteessa on 7 mm puhallusetäisyys vastapintaan ja 50 m/s puhallusnopeus.



Kuva 30. Lämmönsiirtokerroimen jakautuminen vastapinnalle, ratanopeus 1200 m/min

Liikkuvan vastapinnan tilanteessa (kuva 30) nähdään, kuinka suuttimen tulopuolella lämmönsiirtokerroimen jakautuminen vastaa lähes staattista tilannetta, mutta selvästi poistoilman virtaus ohjautuu radan kulkusuuntaan ja tulopuolen ulostuloaukkoa kohti samanaikaisesti. Tulopuolen keskimääräinen lämmönsiirtokerroin on suurempi kuin staattisessa tilanteessa. Suuttimen jättöpuolella havaitaan selvemmin, kuinka virtaus kulkeutuu ainoastaan kohti jättöpuolen ulostuloaukkoa vastapinnan liikkeen mukana. Tämän lisäksi tulopuolen poistoilman virtaus häiritsee jättöpuolen ilmasuihkuja, jolloin paikallisen lämmönsiirtokerroimen radiaalinen heikentyminen on voimakkaampaa jättöpuolella. Kuvaa 31 tarkastelemalla havaitaan myös, että seinämävirtaus irtoaa vastapinnalta suihkun vasemmalla, eli suuttimen jättöpuolella, joka osittain selittää kertoimen pienenemistä. Kuvaa tarkastelemalla huomataan, että nopeusprofiili vastapinnalla pysyy hyvin pinnalla kiinni virtauksen tulopuolella, mutta jättöpuolella nopeus on vastapinnalla käytännössä nolla. Paikallinen lämmönsiirtokerroin mitattuna vastapinnalta suutinreikien kohdalta on suuttimen jättöpuolella korkeampi kuin tulopuolella vastaavissa kohdissa, mutta jättöpuolen keskimääräinen lämmönsiirtokerroin verrattuna staattiseen tilanteeseen on matalampi. Lisäksi, jos tutkitaan tulo- ja jättöpuolien keskimääräistä lämmönsiirtokerrointa keskenään suuttimen x-koordinaatin suhteen, havaitaan, että jättöpuolen arvo on alhaisempi kuin tulopuolen arvo.

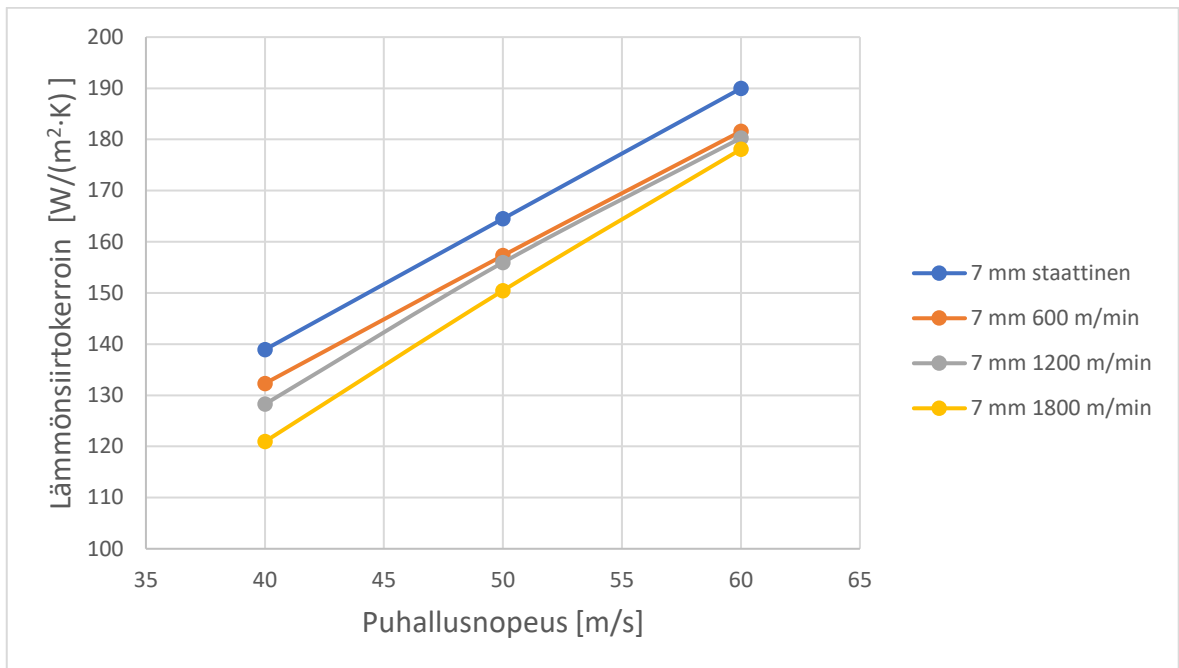


Kuva 31. Ratanopeuden vaikutus yksittäisen reiän suihkuun

Keskimääräiset lämmönsiirtokerroimet koko vastapinnan alueelta tulostettiin ja taulukoitiin (taulukko 5) kolmella eri ratanopeudella, jotka olivat 600 m/min ja 1200 m/min ja 1800 m/min. Lisäksi mitatuista arvoista luotiin kuvaaja (kuva 32). Laskennan muut parametrit olivat taulukon 1 mukaiset. Alumiinipalkkien määrä muutettiin 30:een, ja kummankin päädyn reunimmaisat palkit jätettiin huomioimatta keskiarvon laskennassa.

Taulukko 5. Lämmönsiirtokerroin eri rata- ja puhallusnopeuksilla

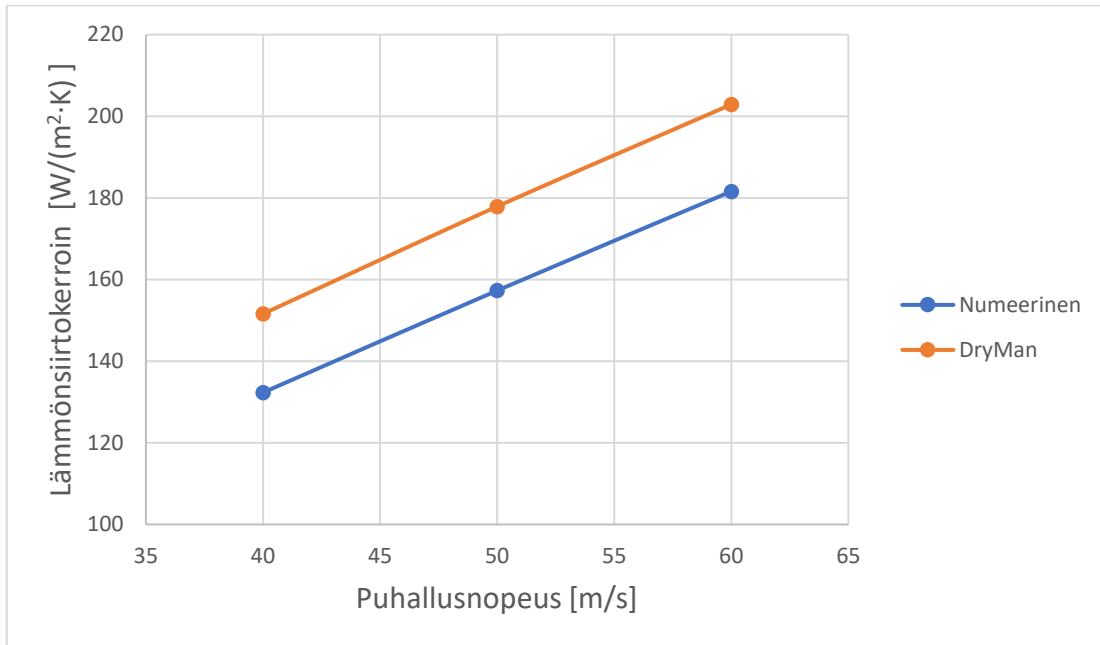
Ratanopeus	Puhallusnopeus [m/s]		
[m/min]	40	50	60
0	133,1	164,5	190,0
600	132,3	157,3	181,6
1200	128,3	156,0	180,3
1800	120,9	150,5	178,1



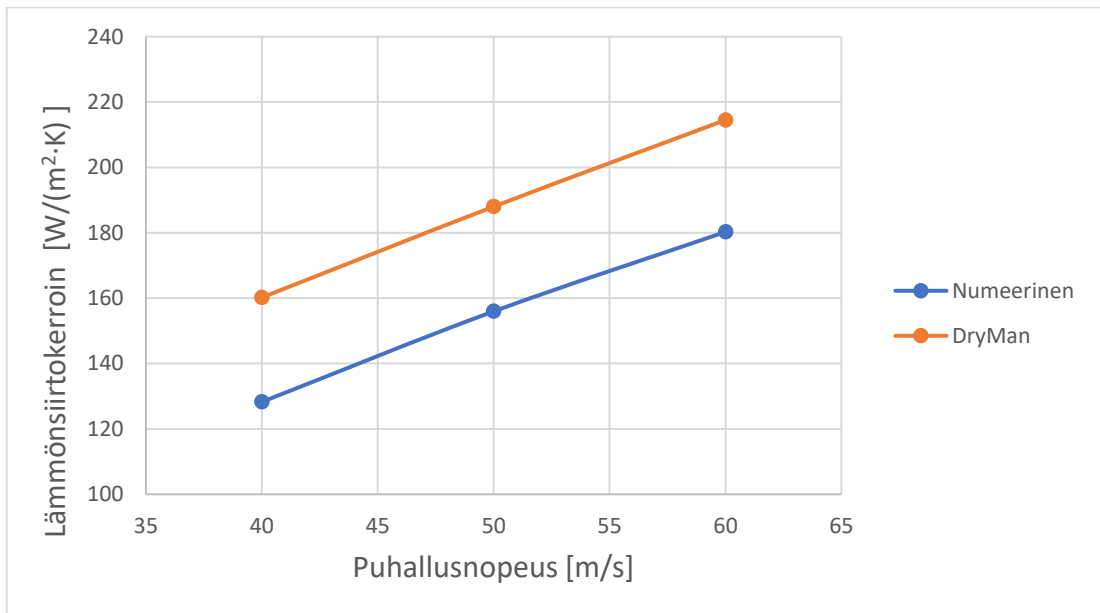
Kuva 32. Lämmönsiirtokerroimien vertailu liikkuvassa tilanteessa

Tuloksista voidaan havaita, että ratanopeuden kasvattaminen alentaa keskimääräistä lämmönsiirtokerrointa, ja on arvoltaan alhaisin 1800 m/min ratanopeudella. Vaikutus on suurimmillaan 40 m/s puhallusnopeudella, ja pienimmillään 60 m/s puhallusnopeudella. Kuten aiemmin todettiin, liikkuvassa tilanteessa lämmönsiirtokerroin on korkeampi suuttimen tulopuolella kuin staattisessa tilanteessa, mutta huomattavasti alhaisempi jättöpuolen keskimääräinen lämmönsiirtokerroin alentaa koko tarkastellun vastapinnan lämmönsiirtokerrointa niin, että kokonaiskeskiarvo on alhaisempi kuin staattisessa tilanteessa. Korkeampi puhallusnopeus johtaa siihen, että virtaus vastustaa paremmin vastapinnan liikkeen aiheuttamaa horisontaalista voimaa, jolloin suurempi massavirta saavuttaa vastapinnan paremmin, nostaen lämmönsiirtoa. Chitsazan & Klepp & Glasmacher päätyivät tutkimuksessaan (2022, 3) myös tulokseen, jossa keskimääräinen Nusseltin luku aleni, kun vastapinnan liikkeen nopeus kasvoi. Päälystysasemalla tai -koneella on aina kyseessä liikkuva tilanne, kun ilma-kuivaimet ovat käytössä, joten lämmönsiirron tunteminen liikkuvalla vastapinnalla on staattista tilannetta olennaisempaa.

DryMan-simulointimalli mahdollistaa lämmönsiirtokerroimen tutkimisen myös liikkuvissa tilanteissa, joten numeerisen ratkaisun tuloksia verrattiin sen tuottamiin vastaavilla parametreilla laskettuihin tuloksiin. Vertailu tehtiin 600 m/min ja 1200 m/min ratanopeuksilla ja niistä luotiin kuvaajat (kuva 33 ja kuva 34).



Kuva 33. Numeerisen ja DryMan-ohjelman ratkaisun vertailu 600 m/min ratanopeudella

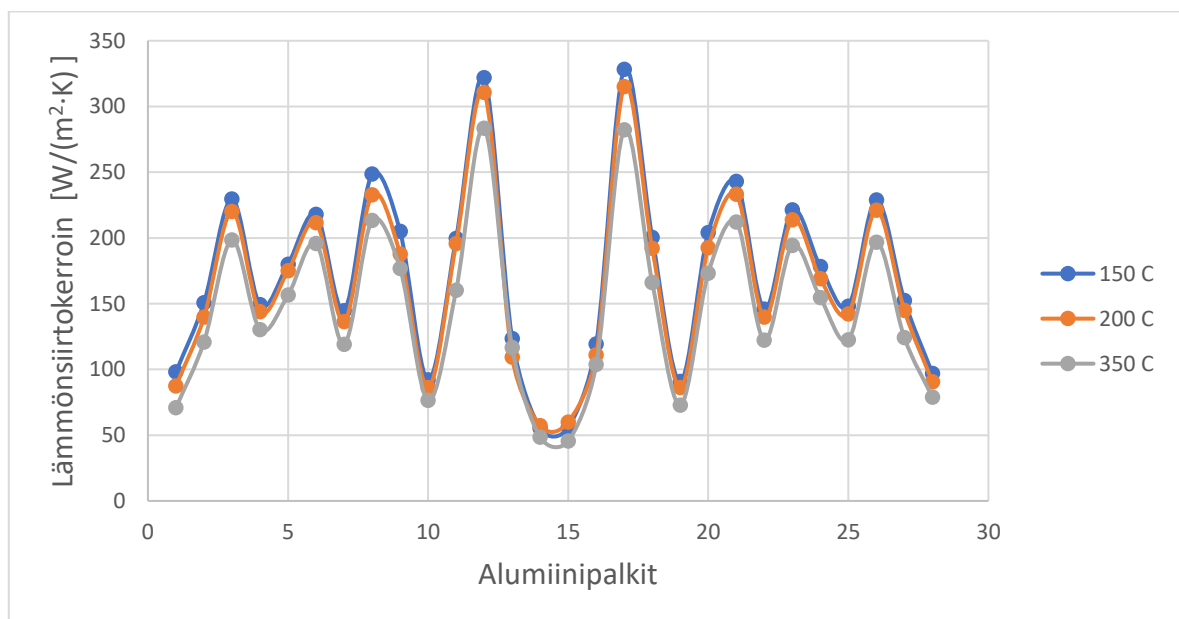


Kuva 34. Numeerisen ja DryMan-ohjelman ratkaisun vertailu 1200 m/min ratanopeudella

Kuvaajista nähdään, kuinka liikkuvassa tilanteessa DryMan-simulointimalli ennustaa korkeampia lämmönsiirtokertoimia kuin numeerinen ratkaisu. Ratanopeudella 600 m/min, ohjelman ratkaisun keskimääräinen lämmönsiirtokerroin oli noin 12 % suurempi, ja nopeudella

1200 m/min noin 18 % suurempi, kuin numeerisissa tuloksissa. Tämä selittynee osittain sillä, että DryMan-ohjelmassa hyödynnetään liikkuvissa tilanteissa Foil-tyyppisten suutinten mitausdataa. Foil-suuttimissa puhallus tapahtuu raosta radan kulkusuuntaan, jolloin myös ratanopeuden kasvu kiihdyttää virtausnopeutta.

Lisäksi haluttiin tutkia puhallusilman lämpötilan vaikutusta keskimääräiseen lämmönsiirtokertoimeen. Tätä varten tehtiin simulaatiot kahdella lämpötilalla, jotka olivat 150 °C ja 350 °C aiemman 200 °C lisäksi. Puhallusetäisyys oli 14 mm, puhallusnopeus 50 m/s ja vastapinta staattinen jokaisessa tutkitussa tapauksessa. Lämmönsiirtokertoimen mittaus toteutettiin tiheämmällä jaolla kuin kuvassa 26. Tämä mahdollisti myös kertoimen jakautumisen tarkemman tutkimisen, joka ei ole mahdollista toteuttaa nykyisellä koejärjestelyllä Alfasimulaattorissa.

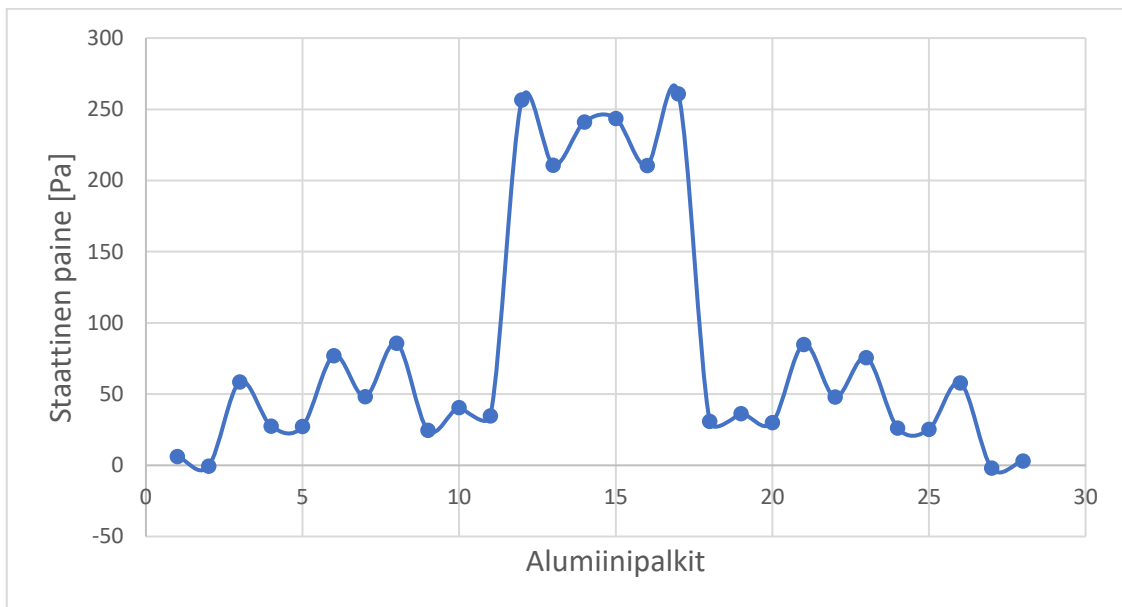


Kuva 35. Puhalluslämpötilan vaikutus lämmönsiirtokertoimeen

Tuloksista (kuva 35) nähdään, kuinka lämpötilan kasvattaminen alentaa kaavan 5 mukaisesti lämmönsiirtokerrointa, joka onkin oletettavissa johtuen siitä, että lämpötilagradientin kasvaminen aiheuttaa lämpötilarajakerroksen paksunemisesta, joka taas hidastaa lämmönsiirtoa (Mujumdar 2015, 376). Paikallinen lämmönsiirtokerroin oli korkein toisiaan vastaan puhaltavilla reikäriveillä. Näiden reikärivien reikäjako on tiheämpi kuin suorapuhallusosuuksilla, joten niiden alla oleviin palkkeihin kohdistuu suurin massavirta. Kokonaismassavirran

suuruus 150 °C asteessa oli 11 % suurempi kuin 200 °C asteessa ja 350 °C asteessa 23 % pienempi kuin 200 °C asteessa. Korkeammilla lämpötiloilla tarvitaan siis suurempi massavirta, jotta päästään samoihin puhallusnopeuksiin ja sen takia korkeampiin lämmönsiirtokerrotimeihin. Suutintyyppin valinnalla voidaan minimoida kokonaispainehäviö, kun massavirtaa kasvatetaan, sillä reikämäärää kasvattamalla virtaus kuristuu vähemmän.

Numeerisesta ratkaisusta saatiin myös vastapinnalla vaikuttavan keskimääräisen paineen arvot palkeittain, ja näistä luotiin kuvaaja (kuva 36). Laskennan parametrit olivat taulukon 1 mukaiset.

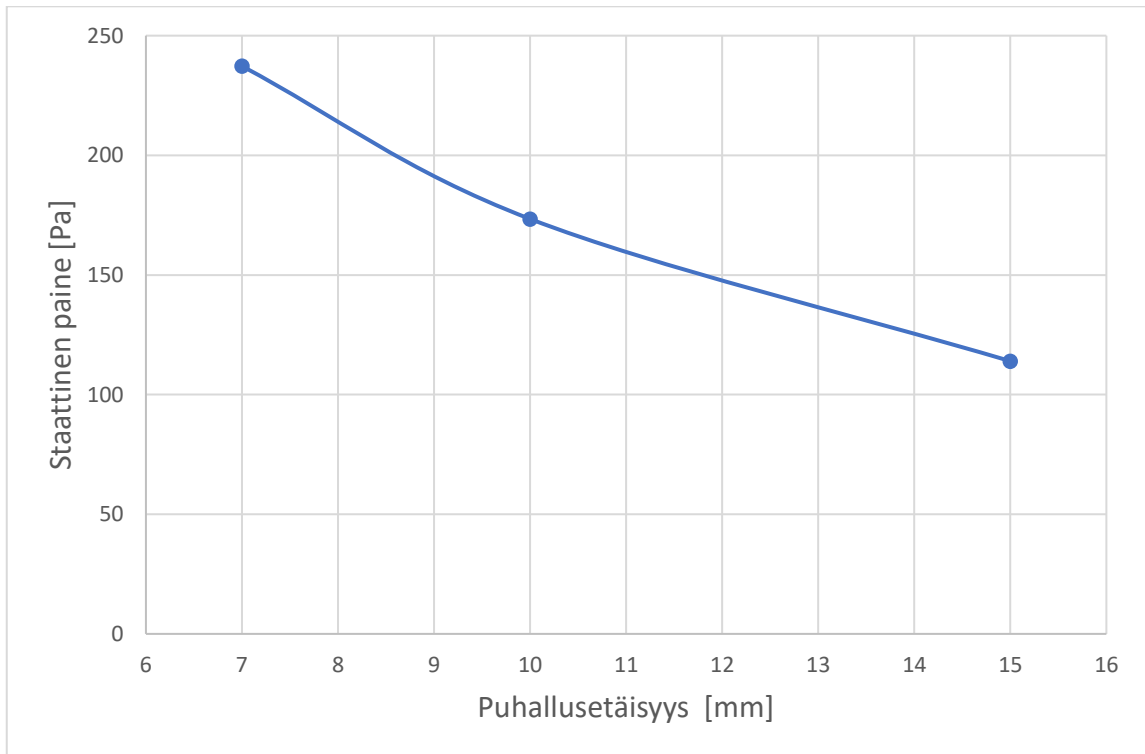


Kuva 36. Vastapinnalla vaikuttava staattinen paine

Kuvaajasta nähdään, kuinka paine on suurimmillaan vastakkain olevien Coandä-pintojen keskellä, jolloin keskimääräinen suuttimen ja vastapinnan välinen staattinen paine on tällä tarkasteluvälillä noin 240 Pa.

Kuten keskimääräisen lämmönsiirtokerroimen tutkimisessa, myös staattisen paineen muutosta eri puhallusetäisyyksillä simuloitiin. Puhallusnopeudella ei havaittu olevan merkitystä tuloksiin, joten tuloksista luotiin kuvaaja vain puhallusetäisyyden funktiona (kuva 37). Puhallusetäisyydet olivat jälleen 7 mm, 10 mm ja 15 mm. Staattisen paineen tunteminen on olennaista, jotta puhallusetäisyys osataan säätää niin, ettei rata kosketa suutinpintaa eikä

ajaudu myöskään liian kauas pinnasta, jolloin keskimääräinen lämmönsiirtokerroin heikkenee. Radan ja suutinpinnan väliseen staattiseen paineeseen voidaan vaikuttaa säätämällä poistoilmapuhaltimen tehoa.

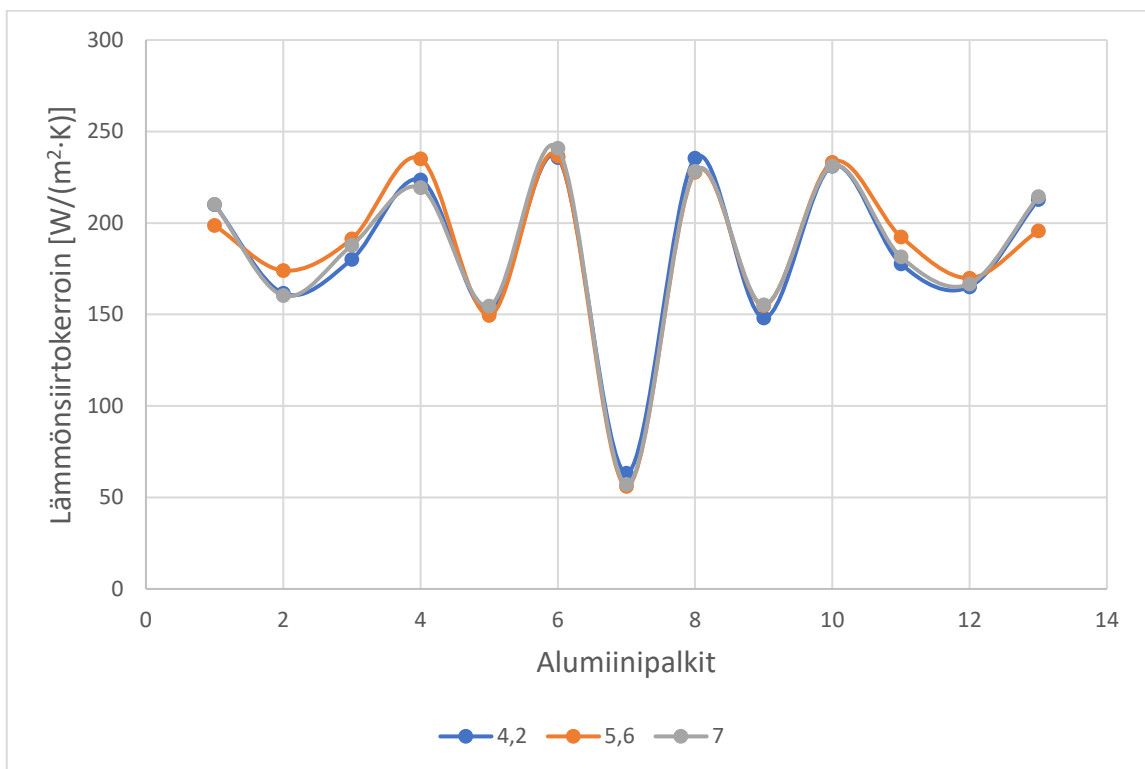


Kuva 37. Staattinen paine puhallusetäisyyden funktiona

Tuloksista nähdään, kuinka keskimääräinen vastapinnan staattinen paine laskee puhallusetäisyyden kasvaessa, joka onkin oletettavissa, sillä tilavuus vastapinnan ja suuttimen välillä suurenee, ja virtausnopeus heikkenee mentäessä kauemmas suutinreiästä. Kuten aiemmin todettiin, myös lämmönsiirtokerroin alenee puhallusetäisyyden kasvaessa, joten radan ajettavuuden ja mahdollisimman tehokkaan lämmönsiirron kannalta rataetäisyyden optimaalinen etäisyys on tärkeä suunnitteluparametri.

4.4 Suuttimen reikien variointi

Tutkimuksen viimeisessä vaiheessa tuotettiin uudet periodiset laskentahilat niin, että aiemmin simuloidun suuttimen suorapuhallusosuuksien reikäkokoa varioitiin. Vinosti puhaltavien reikien koko pidettiin alkuperäisenä. Myös kokonaisreikäprosentti pidettiin vakiona, joten suorapuhallusosuuksien reikäjaon tiheys muuttui. Tämän myötä myös reikäkohtainen massavirta poikkesi tutkittujen tapauksien kesken, mutta koko suuttimen pituudelta kokonaismassavirta pysyi vakiona. Hila- ja ratkaisuasetukset olivat samat kuin aiemmin esitellyssä laskennassa ja vastapinta pidettiin staattisena. Tutkitut reikähalkaisijat olivat aiemmin tutkitun 5,6 mm reiän lisäksi 4,2 mm ja 7 mm.



Kuva 38. Reikäkoon ja -jaon vaikutus lämmönsiirtokerroimeen

Kuten nähdään kuvasta 38, lämmönsiirtokerroimen jakautuminen on käytännössä identtinen jokaisessa kolmessa tutkitussa tapauksessa, joka selittyy sillä, että reikärivit sijaitsevat alumiinipalkkeihin nähden samassa linjassa. Myös keskimääräisten lämmönsiirtokerroimien arvo pysyy käytännössä samana, ja pieni ero tapauksien kesken selittyy sillä, että myös

suutinkammion staattinen paine ja sitä myötä puhallusnopeus vaihteli hieman tapauksien kesken. Taulukossa 6 on esitetty laskentatulokset.

Taulukko 6. Reikäkoon- ja jaon varioinnin tulokset

Reiän halkaisija [mm]	Suutinkammion staattinen paine [Pa]	Puhallusnopeus [m/s]	Keskimääräinen lämmönsiirtokerroin [$W/(m^2 \cdot K)$]
4,2	1201,0	56,8	184,3
5,6	1180,8	56,3	185,8
7	1119,8	54,9	185,2

Tuloksista huomataan, ettei reikäkoon muuttamisella ole käytännössä merkitystä haihdutuksen tehostamisen kannalta, sillä kokonaisreikäprosentin pitäminen vakiona johtaa samaan massavirtaan ja lämmönsiirtokerroimeen. Lämmönsiirtokerroimen jakautuminen suuttimen y- eli poikkisuunnassa toki poikkeaa tapausten kesken, mutta epätasainen jakautuminen tässä suunnassa ei tietävästi ole ollut ongelma tasaisen paperi- tai kartonkilaadun kannalta. Voidaan siis todeta, että jos tutkitulla suutinmallilla halutaan kasvattaa lämmönsiirtokerrointa, täytyy massavirtaa lisätä. Massavirran lisääminen kasvattaa painevastusta ja puhallusnopeutta, joten lisäämällä reikärivejä saavutetaan suurempi lämmönsiirtokerroin pienemmällä painehäviöllä. Nykyisellä suutingeometrialla ei siis saada parannettua haihdutustehoa, lisäämättä järjestelmän energiankulutusta.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa tutkittiin CFD-laskennan soveltuvuutta ilmakehävainien puhallussuuttimien lämmön- ja massansiirtokertoimien ennustamiseen. Työssä oli tarkoitus vastata tutkimusongelmasta johdettuihin tutkimuskysymyksiin, jotka olivat

- Kuinka luotettavia tuloksia numeerinen virtauslaskenta tuottaa?
- Kuinka reikägeometria vaikuttaa virtauksen kuristumaan?
- Kuinka ratanopeus vaikuttaa lämmönsiirtokerrotimeen?

Tutkimusmetodeina olivat kirjallisuustutkimus ja numeerinen virtauslaskenta. Numeerisen laskennan tulosten validiteettia varmistettiin vertaamalla yhden reiän suuttimen laskennan tuloksia analyttisten ratkaisujen tuloksiin ja lisäksi varsinaisen suuttimen numeerisen laskennan tuloksia aiemmassa yrityksen sisäisessä tutkimuksessa tehtyihin kokeellisen menetelmän tuloksiin. Numeerisessa menetelmässä tehtiin myös herkkyystarkastelu varioimalla hilatiheyttä ja turbulenssimallia yhden reiän suuttimelle. Tuloksista voitiin todeta, että laskentahila-asetukset ja laskentaparametrit soveltuvat varsinaisten suuttimien tarkasteluun.

Lopputuloksena voidaan todeta, että tutkimuskysymyksiin vastattiin onnistuneesti ja tulosten perusteella voidaan todeta, että numeerinen virtauslaskenta soveltuu ilmakehävainien suuttimien virtauksien, lämmönsiirron ja staattisten paineiden luotettavaan ja nopeaan tutkimiseen. Suurimmat edut virtauslaskennalla ovat ne, että menetelmä mahdollistaa tulosten saamisen ilman, että suutin on valmistettava ja se, että suuttimia voi tutkia myös tilanteissa, joissa vastapinnan liike on huomioitu.

Lisäksi saatiin useita eri kuroutumakertoimia erilaisille puhallussuuttimissa käytetyille reikägeometrioille, joilla saadaan riittävällä tarkkuudella todellisuutta vastaavat reikägeometriat laskentahilaan. Eri kertoimilla saatuja tuloksia analysoimalla huomattiin, että reiän kartiomainen muoto vaikutti merkittävästi kertoimen suuruuteen. Kertoimen tunteminen on olennaista, jotta tuloaukkojen massavirta osataan asettaa halutun puhallusnopeuden kannalta oikein.

Merkittävimmät tutkimustulokset olivat ne, että keskimääräisen lämmönsiirtokerroin aleni puhallettaessa liikkuvalla pinnalla ja se, ettei reikäkoolla ja -jaolla ollut vaikutusta

keskimääräiseen lämmönsiirtokertoimeen, kun kokonaisreikäprosentti pidettiin vakiona. Lämmönsiirtokertoimen aleneminen radan liikkuvissa tilanteissa todettiin simuloimalla suuttimen virtausta ensin staattisessa tilanteessa, jonka jälkeen simulointi tehtiin kolmella eri vastapinnan nopeudella ja lämmönsiirtokertoimen arvoja verrattiin keskenään. Nykyinen Valmetin käyttämä DryMan-simulointiohjelma kuivatukseen olettaa lämmönsiirtokertoimien nousevan ratanopeuden kasvaessa. Tämän tutkimuksen tulokset ovat kuitenkin tätä olettamusta vastaan, joka todennäköisimmin johtuu siitä, että ohjelmaa kehittäessä on tutkittu vain vanhentyypisiä Foil-suuttimia, joissa puhallus tapahtuu raosta radan kulkusuuntaan, jolloin myös ratanopeuden kasvu kiihdyttää virtausnopeutta. Näissä suuttimissa luonnollisestikin radan ja suutinpinnan etäisyydet ovat alhaisempia kuin tässä tutkimuksessa käytetyssä suuttimessa. Nykyiset käytössä olevat suuttimet ovat yhdistelmiä vastapuhaltavista Float- ja päällepuhallussuuttimista, jotka näin ollen ovat tekniikaltaan Foil-suuttimista merkittävästi poikkeavia. Reikäkoon ja -jaon vaikutusta lämmönsiirtoon tutkittiin mallintamalla kolme suuttimen laskentahilaa, joissa kussakin oli eri reiän halkaisija ja jako. Kokonaisreikäprosentti ja kokonaismassavirta pidettiin molemmat vakiona. Saadut tulokset viittaavat siihen, että jos halutaan tehostaa lämmönsiirtoa lisäämättä järjestelmän energiankulutusta, pitäisi todennäköisesti saada virtaukset enemmän turbulenttisiksi.

Jatkotutkimuksena olisi syytä tutkia liikkuvan pinnan vaikutusta lämmönsiirtokertoimeen kokeellisin menetelmin paperi- tai kartonkikokeekoneella. Verifioidut tulokset voisivat johtaa yrityksen käytössä olevan laskentaperiaatteen päivittämiseen, jolla koko ilmajärjestelmä mitoitetaan. Lisäksi CFD-laskennalla voisi tutkia suutingeometrioiden optimointia kustannustehokkaasti, sillä menetelmä ei vaadi koesuutinten valmistamista eikä kokeellisen testilaitteen käyttämistä. Optimoinnissa voisi tutkia kuinka voitaisiin lisätä virtausten turbulenssia kasvattamatta massavirtaa. Lisäksi voisi tutkia, onko mahdollista poikkeuttaa suuttimen jättö- ja tulopuolen geometrioita niin, että vastapinnan liikkuvissa tilanteissa keskimääräinen puolittainen lämmönsiirtokerroin olisi symmetrinen uhraamatta radan hallittavuutta tai järjestelmän kokonaisenergiatehokkuutta. Täydelliseen, todellisuutta vastaavaan malliin pitäisi myös lisätä päällysteen haihtumisen vaikutus ja tutkia sen vaikutuksia lämmönsiirtokertoimeen.

Lähteet

- Andersson, B. & Andersson, B. 2012. Computational fluid dynamics for engineers. Cambridge, Cambridge University Press. s. 43–135.
- Chitsazan, A., Klepp, G. & Glasmacher, B. 2022. Effect of Surface Motion on Heat Transfer and Pressure Force from Multiple Impinging Jets– A Numerical Study. International Journal of Heat and Technology. Vol. 40, s. 137–144.
- Ek, M., Gellerstedt, G. & Henriksson, G. 2009. Pulp and Paper Chemistry and Technology. Berlin, De Gruyter. Vol. 3, s. 342–365.
- Etna. 2021. Suomen metsäteollisuuden näkymiä vuoteen 2025. Verkkodokumentti. Luettu 21.4.2022. Saatavissa <https://www.etla.fi/wp-content/uploads/ETLA-Raportit-Reports-112.pdf>
- Friendship, K. 2020. Laser cutting or punching? How to choose. Verkkodokumentti. Luettu 08.10.2022. Saatavissa <https://www.aldermantooling.co.uk/laser-cutting-or-punching-how-to-choose/>
- Heikkilä, P. 1993. A study on the drying process of pigment coated paper webs. Academic dissertation. Turku, Åbo Akademi. s. 20–101.
- Heikkilä, P. & Rajala, P. 2009. Papermaking science and technology. Book 11, Pigment coating and surface sizing of paper. 2. p. Helsinki, Finnish Paper Engineers' Association. Vol. 11, nro 15, s. 560–569.
- Incropera, F. P. & DeWitt, D. P. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 4. p. New York, Wiley. Vol 6, s. 20–388.
- Lienhard, J. H. 1984. Velocity coefficients for free jets from sharp-edged orifices. Journal of Fluids Engineering. Vol. 106, s. 13–17.
- Menter, F.R. 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA Journal. Vol. 32, nro. 8, s. 1598–1605.
- Mujumdar, A. S. 2015. Handbook of industrial drying. 4. p. Boca Raton, CRC Press. s. 4–922.

- Paltakari, J. 2009. Papermaking science and technology. Book 11, Pigment coating and surface sizing of paper. 2. p. Helsinki, Finnish Paper Engineers' Association. s. 13–20.
- Rajala, P., Milosavljevic, N., Kiiskinen, H. & Hendrickson, M. 2004. The effect of the impingement air drying on print mottle and other coated paper properties. Applied Thermal Engineering. Vol. 24, nro. 17-18, s. 2528.
- Rodriguez, S. 2019. Applied Computational Fluid Dynamics and Turbulence Modeling Practical Tools, Tips and Techniques. 1. p. Cham, Springer International Publishing. s. 97.
- Shakouchi, T., Kito, M. 2012. Heat transfer enhancement of impinging jet by notched-orifice nozzle. UK, InTech London. s. 443–444.
- Tu, J., Yeoh, G. H. & Liu, C. 2018. Computational fluid dynamics: a practical approach. 2. p. Oxford, Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier. s. 222–277.
- Valmet 2012. Flotation Drying of Coated Grades. Verkkodokumentti. Luettu 21.4.2022. Saatavissa https://www.valmet.com/globalassets/media/downloads/white-papers/drying-and-air-systems/wpd_flotationdrying.pdf
- Valmet 2022. Replace IR drying with OptiDry Coat to reduce energy consumption. Verkkodokumentti. Luettu 21.4.2022. Saatavissa <https://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/new-technology/FPOptiDryCoatHI/>
- Venkateshan, S. P. 2021. Heat Transfer. 3. p. Cham, Springer. s. 2.