



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Miika Kivistö

ILMANJAKOKOTELON ANALYSOINTI JA OPTIMOINTI

Tekniikka
2023

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Miika Kivistö
Opinnäytetyön nimi	Ilmanjakokotelon analysointi ja optimointi
Vuosi	2023
Kieli	suomi
Sivumäärä	58
Ohjaaja	Sami Elomaa

Opinnäytetyössä tutkittiin, olisiko nykyisen metsäkoneen ohjaamon ilmastoinnin tehokkuutta mahdollista parantaa pelkällä kanaviston muokkaamisella. Työn ydin-kohteena oli kahden vaihtoehtoisen ilmanjakokotelon sekä ilmastointilaitteen valmistajan alkuperäisen suorälhtöliitännän tarkempi analysointi. Analysointitulosten ja virtausmekaniikan teorian pohjalta lähdettiin suunnittelemaan optimaalisinta ratkaisua ilman siirtämiseen ilmastointilaitteelta metsäkoneen ohjaamoon.

Opinnäytetyössä perehdyttiin virtausmekaniikan ja CFD-virtaussimuloinnin teoreettiseen taustaan eri aineistojen ja kirjallisuuden avulla. Työn teoriaosuudessa käydään läpi virtausmekaniikan keskeisiä käsitteitä ja laskuja tuttujen matemaattisten kaavojen avulla. Lisäksi perehdymme CFD-virtaussimulointiin ja sen teoriaan. Virtaussimulointi oli merkittävässä roolissa osana opinnäytetyötä.

Analysointiosuudessa todettiin, että painehäviöt ilmanjakojärjestelmässä aiheutuvat enimmäkseen puhallinsuuttimista, mutta painehäviöihin voidaan vaikuttaa paljonkin pelkästään kanaviston optimoinnilla. Optimointiosuudessa saatiin suunniteltua prototyyppi, jossa on alhaisemmat painehäviöt ja lisäksi valmistusteknillisesti kannattavampi valmistaa.

Avainsanat Virtausmekaniikka, virtaussimulointi, virtauslaskenta, ja ilmanjakokotelo.

ABSTRACT

Author	Miika Kivistö
Title	Analysis and optimization of the air distribution box
Year	2023
Language	Finnish
Pages	58
Name of Supervisor	Sami Elomaa

The thesis investigated whether the efficiency of the air conditioning system in the current forest machine could be improved by simply modifying the ductwork. The core focus of the thesis was to analyze in detail two alternative air distribution boxes and the original straight outlet connection of the air conditioning unit from the manufacturer. Based on the analysis results and fluid mechanics theory, the optimal solution for transferring air from the air conditioning unit to the forest machine cab was designed.

The theoretical background of fluid mechanics and CFD flow simulation was studied in the thesis using various sources and literature. The theoretical part of the work covers the key concepts and calculations of fluid mechanics using familiar mathematical formulas. In addition, CFD flow simulation and its theory was studied. Flow simulation played a significant role in the thesis.

In the analysis section, it was found that pressure losses in the air distribution system are mainly caused by the blow nozzles, but pressure losses can be significantly affected by optimizing the ductwork. In the optimization section, a prototype was designed with lower pressure losses and was also more cost-effective to manufacture.

Keywords Fluid mechanics, flow simulation, computational fluid dynamics, and air distribution box.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO.....	8
1.1	Yritysesittely.....	8
2	TYÖN TAUSTA JA TARKOITUS	10
3	VIRTAUSMEKANIikka	11
3.1	Paineet ilmanjakojärjestelmässä	11
3.2	Painehäviöt	12
3.2.1	Kitkahäviöt	12
3.2.2	Kertahäviöt.....	13
3.3	Virtaus putkistossa.....	14
3.3.1	Virtaustyytit ja Reynoldsin luku.....	15
4	CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)	18
4.1	Virtauslaskennan toiminta ja perusteoria	18
4.2	CFD-simulointiprosessi.....	21
4.2.1	Vaihe 1, esikäsittely.....	21
4.2.2	Vaihe 2, simulointi.....	22
4.2.3	Vaihe 3, jälkikäsittely.....	23
5	TOTEUTUS.....	24
5.1	Lähtötilanne	24
5.2	Vaihtoehtoiset mallit	25
5.3	Tilavarausmalli	26
6	ANALYSOINTI	27
6.1	Lähdöt suorasuuntaisesti	27
6.1.1	Paineet ilmanjakojärjestelmässä	27
6.1.2	Ilman jakautuminen eri letkujen ulostuloille	29
6.1.3	Ilman virtausnopeus ja käyttäytyminen järjestelmässä	30

6.1.4	Geometrian luomaa vastusta.....	32
6.2	Lähdöt ympyränmuotoisesti.....	34
6.2.1	Paineet ilmanjakojärjestelmässä	34
6.2.2	Ilman jakautuminen eri letkujen ulostuloille	36
6.2.3	Ilman virtausnopeus ja käyttäytyminen järjestelmässä	37
6.3	Lähdöt suoraliitännästä	38
6.3.1	Paineet ilmanjakojärjestelmässä	38
6.3.2	Ilman jakautuminen eri letkujen ulostuloille	40
6.3.3	Ilman virtausnopeus ja käyttäytyminen järjestelmässä	40
6.3.4	Geometrian luomaa vastusta.....	42
6.4	Analysointiosuuden yhteenveto	43
7	OPTIMOINTIOSUUS	45
7.1	Ilmanjakokotelon geometria.....	45
7.2	Letkujen valinta.....	46
7.2.1	Y-haarat letkuissa	47
7.3	Prototyypit	48
7.3.1	Prototyyppi 1.....	49
7.3.2	Prototyyppi 2.....	51
7.3.3	Prototyyppi 3.....	52
7.4	Optimointiosuuden yhteenveto	55
8	YHTEENVETO OPINNÄYTETYÖSTÄ.....	56
	LÄHTEET	57

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Logset 12F GT ja 8H GTE. (Logset Oy:n kotisivut).	8
Kuva 2. Logset 12H GTE Hybrid. (Logset Oy:n kotisivut).	9
Kuva 3. Bernoullin lain periaate. (Wikipedia 2023 a).	15
Kuva 4. Laminaari- ja turbulenttinen virtaus havainnollistettuna kuvassa. (SCIENCE TRENDS 2020).	17
Kuva 5. Elementtiverkko tetraedrien muotoisista elementeistä.	22
Kuva 6. Vaihtoehtoiset analysoitavat mallit. Vasemmalla lähdöt suorasuuntaisesti, keskellä ympyränmuotoisesti ja oikealla suorälhtöliitäntä.	24
Kuva 7. Vaihtoehtoiset mallit kokoonpanomalleina letkuineen ja kuristimineen.	25
Kuva 8. Tilavarausmalli, johon on liitetty ilmanjakokotelo esimerkiksi.	26
Kuva 9. Contour-kuva staattisen paineen jakautumisesta.	27
Kuva 10. Contour-kuva kokonaispaineen jakautumisesta.	28
Kuva 11. Streamlines Contour-kuvia pyörrevirtauksista ilmanjakokotelon alussa.	31
Kuva 12. Contour-kuva virtausnopeuksien jakautumisesta.	31
Kuva 13. Virtaussuunnassa tapahtuvaa kohtisuora virtausvastusta ja suunnanmuutosta.	32
Kuva 14. Geometrian muodostama tasku.	33
Kuva 15. Sivuttaisprofiilikuva jyrkästä pyöristyksestä.	33
Kuva 16. Contour-kuva staattisen paineen jakautumisesta.	34
Kuva 17. Contour-kuva kokonaispaineen jakautumisesta.	35
Kuva 18. Streamlines Contour-kuvia pyörrevirtauksista ilmanjakokotelon alussa.	37
Kuva 19. Contour-kuva virtausnopeuden jakautumisesta.	37
Kuva 20. Contour-kuva staattisen paineen jakautumisesta.	38
Kuva 21. Contour-kuva kokonaispaineen jakautumisesta.	39
Kuva 22. Streamlines Contour-kuvia suorasta lähtöliitännästä.	41
Kuva 23. Contour-kuva virtausnopeuden jakautumisesta.	41

Kuva 24. Virtaussuunnassa tapahtuvaa kohtisuoraa virtausvastusta.	42
Kuva 25. Sivuttaisprofiilikuva äkillisestä suunnanmuutoksesta.	42
Kuva 26. Prototyyppi 1, jossa neliömäinen muoto sulautuu pyöreäksi.	46
Kuva 27. Contour-kuva virtausnopeuden jakautumisesta prototyypissä 3.	48
Kuva 28. Prototyyppi 1.....	50
Kuva 29. Staattinen painejakauma prototyypissä 1.	50
Kuva 30. Prototyyppi 2.....	51
Kuva 31. Staattinen painejakauma prototyypissä 2.	52
Kuva 32. Prototyyppi 3.....	53
Kuva 33. Staattinen painejakauma prototyypissä 3.	53
Kuva 34. Ilman jakautuminen lähtöjen ulostuloille.	54
Taulukko 1. Paineet ja painehäviöt.	29
Taulukko 2. Ilman jakautuminen eri lähtöjen ulostuloille.....	30
Taulukko 3. Paineet ja painehäviöt.	35
Taulukko 4. Ilman jakautuminen eri lähtöjen ulostuloille.....	36
Taulukko 5. Paineet ja painehäviöt.	39
Taulukko 6. Ilman jakautuminen eri lähtöjen ulostuloille.....	40

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö suoritettiin osana konetekniikan opintoja keväällä 2023. Työn toimeksiantajana toimi metsäkonevalmistaja Logset Oy. Tässä raportissa käymme läpi yritysesityä, työn taustaa sekä tarkoitusta, CFD-virtaussimulointityökalua, työn toteutusta ja tuloksia. Teoriaosuudessa käsittelemme työn toteutukseen liittyvää virtausmekaniikkaa.

1.1 Yritysesitys

Logset Oy on vuonna 1992 perustettu suomalainen metsäkonevalmistaja, joka valmistaa harvesteripäitä, harvestereita ja kuormatraktoreita. Yrityksen tehdas ja toimitilat sijaitsevat Koivulahdessa lähellä Vaasaa. Yritys työllistää noin 70 työntekijää. (Wikipedia 2022 c).

Logset Oy:n tuotevalikoimasta löytyy seitsemän harvesteripäätä, seitsemän harvesteria ja seitsemän kuormatraktoria. Kaikki tuotevalikoiman tuotteet valmistetaan yhtiön omalla tehtaalla Koivulahdessa. Tuotteiden lisäksi yrityksen palveluihin kuuluu myös huoltopalvelut, varaosamyynti, käyttökoulutus ja muut tarvittavat asiakastukipalvelut. Logsetilla on jälleenmyyjä ympäri maailmaa 32 eri maassa. Alla olevassa kuvassa (**Kuva 1.**) on esiteltynä vasemmalla kuormatraktori ja oikealla harvesteri. (Wikipedia 2022 c).



Kuva 1. Logset 12F GT ja 8H GTE. (Logset Oy:n kotisivut).

Logset esitteli ja toi markkinoille maailman ensimmäisen hybridiharvesterin, Logset 12H GTE Hybridin vuonna 2016. Tämän uuden teknologian avulla harvesterin tuottamat hiilidioksidipäästöt vähenivät kolmanneksella per tuotettu kuutiometri. Kolme vuotta myöhemmin vuonna 2019 Logset julkaisi toisen hybridiharvesterinsa Logset 8h GTE Hybridin. Alla olevassa kuvassa (**kuva 2.**) esiteltynä maailman ensimmäinen hybridiharvesteri. (Wikipedia 2022 c).



Kuva 2. Logset 12H GTE Hybrid. (Logset Oy:n kotisivut).

2 TYÖN TAUSTA JA TARKOITUS

Metsäkoneen ohjaamon yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on ilmastointi. Metsäkoneiden kuskit viettävät suurimman osan työajastaan metsäkoneen ohjaamossa, joten on tärkeää, että metsäkoneen sisäilma pysyy olosuhteista riippumatta riittävän viileänä tai lämpimänä. Mikäli ilmastointi ei ole riittävän tehokas, niin pitkien aikojen viettäminen ohjaamossa kuumissa ääriolosuhteissa voi olla hyvin epämuokavaa tai jopa vaarallista. Ilmastoinnin tehtävä on pitää kuskin olo viileänä, miellyttävänä ja virkeänä ulkoilman ollessa paahtavan kuuma.

Työn tarkoituksena oli selvittää, voitaisiinko metsäkoneen ohjaamon ilmastoinnin tehokkuutta parantaa pelkästään kanavistoa muokkaamalla. Käytettävän ilmastointilaitteen teoreettinen kapasiteetti on $870 \text{ m}^3/\text{h}$ ilman kanaviston luomaa vastapainetta. Näin ollen ilmastointilaitteelta saataisiin enemmän kapasiteettia ulos, mitä vähemmän kanavistossa syntyy vastapainetta, jolloin myös ilmastoinnin jäähdysteho kasvaa. Vastapaine on kanavistossa syntyvää virtausvastusta. Virtausvastuksen määrä voidaan selvittää tulo- ja lähtöilman paine-erona, joka on systeemissä syntynyt painehäviö tai virtaavan fluidin lämpötilan muutoksena.

Työn yksi avainkysymys oli myös se, että onko erillistä ilmanjakokoteloä ylipääntänsä kannattavaa suunnitella. Logset Oy on saanut ilmastointilaitteiden valmistajalta sellaisen käsityksen, että alkuperäinen suorälhtöliitântä olisi parempi vaihtoehto ja näin ollen erillisen ilmanjakokotelon suunnittelu olisi turhaa. Heidän mielestään puhallinsuuttimien aiheuttama virtausvastus on niin suuri, että muun kanaviston vastus on siihen verrattuna aika merkityksetön.

3 VIRTAUSMEKANIikka

Tässä luvussa perehdytään virtausmekaniikan teoreettiseen taustaan yleisellä tasolla käymällä läpi virtausmekaniikan keskeisiä käsitteitä ja laskukaavoja.

Virtausmekaniikka yleisesti käsittelee fluideja eli nesteitä ja kaasuja. Virtausmekaniikka jakautuu muun muassa hydrostaatiikkaan ja virtausdynamiikkaan. Hydrostaatiikassa tutkitaan levossa olevia fluideja ja virtausdynamiikassa liikkeessä olevia fluideja. (Wikipedia 2022 d). Opinnäytetyössä analysoitiin liikkeessä olevan ilman eli kaasun käyttäytymistä.

3.1 Paineet ilmanjakojärjestelmässä

Yleisesti määriteltynä paine on voima jaettuna voimaa vastaan kohtisuoralla pinta-alalla. Paineen suuruuteen vaikuttaa voima ja alan suuruus, johon voima kohdistuu. (Momentti 1 2006, 301). Paine voidaan laskea alla olevalla kaavalla:

$$P = \frac{F}{A}, \text{ jossa} \quad F = \text{voima}$$

$$A = \text{pinta-ala.}$$

Kun puhutaan ilmanpaineista ilmanjakojärjestelmässä, esiintyy siellä kahdenlaista painetta: staattista- ja dynaamista painetta. Kyseisten paineiden ymmärtäminen on keskeisessä roolissa ilmanjakojärjestelmän analysoinnissa ja optimoinnissa. Näiden paineiden yhteenlaskettu summa on järjestelmässä vallitseva kokonaispaine. (ELDRIDGE 2020). Kokonaispaine saadaan kaavasta:

$$P_t = p_s + p_d, \text{ jossa} \quad p_s = \text{staattinen paine}$$

$$p_d = \text{dynaaminen paine.}$$

Staattinen paine on fluidin sisäistä painetta, joka vaikuttaa järjestelmässä kaikkiin suuntiin samansuuruisena. Siinä ei oteta huomioon fluidin liikkeestä aiheutuvaa

painetta. Staattinen paine on vastusta, jota ilmavirta kokee virratessaan kanaviston läpi. Yksinkertainen esimerkki staattisesta paineesta on ilmapallon sisällä olevan ilman kohdistama voima pallon sisäpuolelle. (ELDRIDGE 2020).

Dynaaminen paine, joka tunnetaan myös nimellä kineettinen paine, on fluidin virtausliikkeestä aiheutuvaa painetta. Se on aina positiivinen, vaikuttaa vain fluidin virtaussuunnassa, suurenee virtausnopeuden ja fluidin tiheyden kasvaessa. Yksinkertainen esimerkki dynaamisesta paineesta on se, kun työnnät käden ulos kiihdyttävän auton ikkunasta ja tunnet kuinka ilmanvirtauksesta aiheutuva dynaaminen paine kätesi pinnalla kasvaa. Dynaaminen paine voidaan laskea alla olevalla kaavalla. (ELDRIDGE 2020).

$$P_d = \frac{1}{2} \rho v^2, \text{ jossa}$$

ρ = tiheys

v^2 = fluidin virtausnopeus.

3.2 Painehäviöt

Painehäviöt ovat virtauksen mekaanisen liike-energian muuttumista lämmöksi. Painehäviöt voidaan havaita paine-erona fluidia kuljettavan järjestelmän kahden pisteen välillä sekä fluidin lämpiämisenä. (Metropolia 2009).

Painehäviöt eli paineen aleneminen liittyvät suoraan ilman virtausnopeuteen, ominaispainoon, viskositeettiin, virtauskohdan sisäosan poikkipinta-alaan, geometriaan ja pinnankarheuteen. Putkivirtauksessa syntyvät painehäviöt voidaan jakaa kahteen ryhmään, jotka ovat kitkahäviöt ja kertahäviöt. (Metropolia 2009).

3.2.1 Kitkahäviöt

Kitkahäviöt putkivirtauksessa johtuvat fluidin ja putken sisäpinnan välisestä kitkasta. Tämän lisäksi itse fluidin sisällä esiintyy myös kitkaa, joka on fluidin sisäistä kitkaa. Tämä tunnetaan myös nimellä viskositeetti. Viskositeetti aiheutuu molekyylien välisistä vetovoimista. (Momentti 1 2006, 333).

Virtausnopeus vaikuttaa suoraan kitkahäviön suuruuteen. Tämä johtuu siitä, että virtauksen kasvaessa fluidin ja putken sisäpinnan välinen kitka kasvaa. Tämän lisäksi myös fluidin sisäiset kitkavoimat kasvavat. (Tec-science 2020). Kitka on ilmiö, joka vastustaa kahden kappaleen suhteellista liikettä aiheuttaen mekaanista hankausta ja kulumista. Ilmiön seurauksena mekaaninen energia muuttuu lämpöenergiaksi. (Momentti 1 2006, 106). Kitkahäviöiden aiheuttama painehäviö voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} * \frac{v^2 \rho}{2}, \text{ jossa}$$

λ = kitkavastuskerroin

l = putken pituus

d = putken sisähalkaisija

v^2 = virtausnopeus

ρ = fluidin tiheys.

3.2.2 Kertahäviöt

Kertahäviöt putkistossa johtuvat geometrisista muutoksista, jotka aiheuttavat vastusta virtaukselle. Tämä aiheuttaa paineen alenemista, koska virtaus pyrkii aina kulkemaan suorinta reittiä. Geometrian muutoksien seurauksena tapahtuu poikkipinnan, virtausnopeuden ja -suunnan muutoksia. Kertahäviöiden aiheuttamien painehäviöiden suuruus on teoreettisesti hyvin hankalaa laskea ja usein joudutaan turvautumaan erilaisiin käytännön kokeisiin. Laskemisesta vaikean tekee kertavastuskertoimen määrittäminen, koska se riippuu rakenneosan geometriasta sekä usein myös Reynoldsin luvusta. (Metropolia 2009). Kertahäviöt voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho v^2}{2}, \text{ jossa}$$

ζ = kertavastuskerroin

ρ = fluidin tiheys

$v^2 =$ virtausnopeus.

3.3 Virtaus putkistossa

Putkistossa esiintyvän virtauksen suuruutta kuvataan usein tilavuus- tai massavirtana. Tilavuusvirta kuvastaa putken poikkipinta-alan läpi virtaavan aineen tilavuuden aikayksikköä kohden. Massavirta kuvastaa taas putken poikkipinta-alan läpi virtaavan aineen massan aikayksikköä kohden. (Rantanen 2019, 10). Tilavuus- ja massavirta voidaan laskea seuraavilla kaavalla:

$$q_v = Av, \text{ jossa}$$

$q_v =$ tilavuusvirta

$A =$ putken poikkipinta-ala

$v =$ virtausnopeus

$$q_m = \rho q_v, \text{ jossa}$$

$q_m =$ massavirta

$\rho =$ tiheys.

Virtausnopeus voidaan laskea tietyssä putkidimensiossa tietyllä tilavuusvirralla seuraavalla kaavalla:

$$v = \frac{4q_v}{\pi d^2}, \text{ jossa}$$

$d =$ putken sisähalkaisija.

Jatkuvuusyhtälöllä voidaan ilmaista massavirran säilyminen putkiston eri osissa. Yhtälön mukaan virtaavan aineen nopeus kasvaa putkiston poikkipinta-alan pientyessä ja päinvastoin. (Rantanen 2019, 11). Alla esiteltynä jatkuvuusyhtälön kaava kokoonpuristuvalla fluidille:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

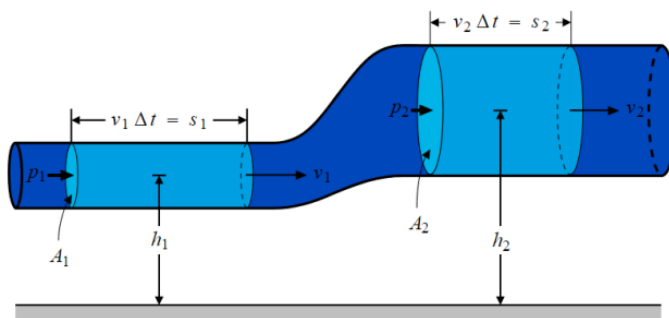
Bernoullin yhtälöllä voidaan ilmaista putkessa virtaavan fluidin virtauksen energiamäärä. Sitä pidetään virtausopin perusyhtälönä. Bernoullin lain mukaan putkistossa virtaavan fluidin virtausnopeus kasvaa ja paine laskee, kun putkisto kapenee. (Kurkinen 2017, 9). Alla olevassa kuvassa (**Kuva 3.**) esiteltynä Bernoullin lain periaate. Bernoullin yhtälö kitkattomalle ja kokoonpuristumattomalle virtaukselle on esiteltynä myös alla:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + pgh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + pgh_2, \text{ jossa}$$

p = absoluuttinen paine

v = virtausnopeus

h = korkeus vertailutasosta.



Kuva 3. Bernoullin lain periaate. (Wikipedia 2023 a).

3.3.1 Virtaustyytit ja Reynoldsin luku

Putkivirtauksessa esiintyy kahdenlaista virtauslajia, jotka ovat laminaarinen- ja turbulenttinen virtaus. Virtaustyytit ovat havainnollistettuna alempana olevassa kuvassa (**Kuva 4.**). Laminaarinen virtaus on virtausta, jossa fluidi virtaa ns. virtaviivojen suuntaisesti. Laminaarisessa virtauksessa fluidin hiukkaset etenevät järjestäytyneesti rinnakkain tasaisissa kerroksissa. Nämä kerrokset pysyvät erillisinä eivätkä sekoitu keskenään, mutta ne voivat liukua eri nopeuksilla toistensa ohi. Virtauksen ollessa laminaarista, putken sisäpinnan karheudella ei ole vaikutusta syntyviin painehäviöihin. (Metropolia 2009).

Turbulenttinen virtaus on virtausta, jossa fluidin hiukkaset pyörteilevät ja sekoituvat hallitsemattomasti keskenään virtauksen eri kerroksissa. Virtauksen ollessa turbulenttista, putken sisäpinnan karheudella on suuri vaikutus syntyviin painehäviöihin. Turbulenttisessa virtauksessa menetetty energia on suurempi, koska kitkavoimat kasvavat. (Metropolia 2009).

Reynoldsin luku on dimensioton luku, jolla virtauslajit voidaan määrittää ja jakaa laminaariseen- ja turbulenttiseen virtaukseen. Reynoldsin luvun ollessa alle 2 100 on virtaus aina laminaarista. Reynoldsin luvun kasvaessa yli 4 000 on virtaus tällöin turbulenttista. Tässä kohtaa fluidin sisäiset viskoosit voimat eivät kykene enää pitämään pyörteilyä kurissa, jolloin laminaarinen virtaus on muuttunut täysin turbulenttiseksi virtaukseksi. Reynoldsin luvun ollessa 2 100–4 000 on virtaus ns. siirtymäalueella, jolloin se on sekoitus laminaarista- ja turbulenttista virtausta. Virtaus-tyypin muutos tapahtuu virtausnopeuden kasvaessa tai jonkin geometriamuutoksen aiheuttaman häiriötekijän vaikutuksesta. Virtauslaji vaikuttaa putkistossa syntyviin virtausvastuksiin ja painehäviöihin. (Metropolia 2009). Reynoldsin luku saadaan kaavasta:

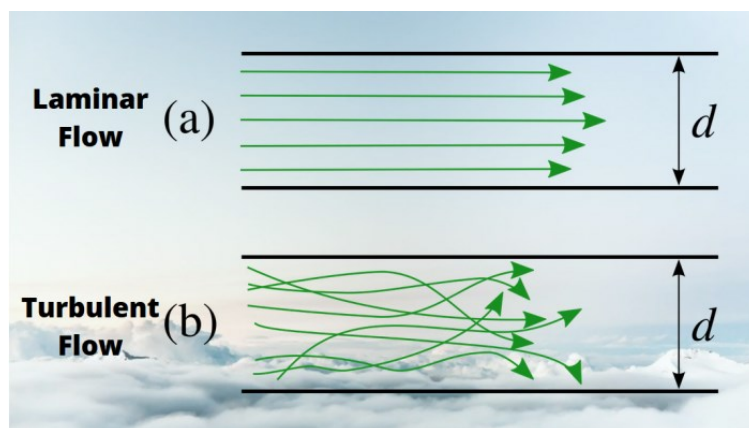
$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}, \text{ jossa}$$

ρ = aineen tiheys

v = keskimääräinen nopeus

d = putken sisähalkaisija

η = fluidin viskositeetti.



Kuva 4. Laminaari- ja turbulenttinen virtaus havainnollistettuna kuvassa. (SCIENCE TRENDS 2020).

4 CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Computational fluid dynamics eli numeerinen virtauslaskenta on hyvin monipuolinen työkalu, jolla pystytään simuloimaan muun muassa eri prosessien ja laitteiden toimintaa ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Virtauslaskentaa pystytään käyttämään kaikissa mahdollisissa sovelluksissa, joihin liittyy neste- tai kaasuvirtausta. Virtauslaskentatyökalulla pystytään simuloimaan nesteiden tai kaasujen käyttäytymistä ja vuorovaikutusta ympärillä olevien pintojen kanssa. Monissa tapauksissa simuloitavien kohteiden geometriat käyvät niin monimutkaisiksi, että niiden laskenta olisi muilla keinoilla hyvin hankalaa tai monesti jopa mahdotonta. (Stressfield 2023).

Virtauslaskentaa käytetään monenlaisissa tutkimus- ja suunnitteluongelmissa eri tieteen- ja teollisuuden aloilla. Tyypillisimpiä käyttökohteita ovat aerodynamiikka ja ilmailuanalyysit, teollisuusjärjestelmien suunnittelu ja analysointi, neste/kaasuvirrat ja lämmönsiirto sekä moottori- ja polttoanalyysit. (Wikipedia 2023 b).

4.1 Virtauslaskennan toiminta ja perusteoria

Numeerisen virtauslaskennan toiminta perustuu tietokoneen suorittamiin laskutoimituksiin. Virtauslaskenta on erilaisten virtauksien tutkimista ja analysointia tietokoneohjelmistolla. Tietokoneen laskentateho vaikuttaa paljon siihen, kuinka nopeasti simuloinnit saadaan suoritettua. Virtauksien tutkimista ja analysointia varten tarvitaan tietokone, sopiva CFD-ohjelmisto ja malligeometria simuloitavasta kappaleesta. Erilaisia CFD-ohjelmistoja on tarjolla useita. Tällaisia ovat esimerkiksi Ansys Fluent, Solidworks flow, Openfoam ja NX Flow. (Karjalainen 2021, 7). Tässä opinnäytetyössä käytettiin NX Flow -ohjelmistoa.

Malligeometriaa varten tarvitaan CAD-ohjelmisto. CAD eli tietokoneavusteinen suunnittelu on ohjelmisto, jolla pystytään luomaan digitaalisesti 2D-piirustuksia ja 3D-malleja todellisista tuotteista. CAD- ja CFD-ohjelmistot mahdollistavat visuaa-

lisen prototyypin suunnittelun ja käytännön testaamisen ilman, että tarvitaan valmistaa ja testata erillistä fyysistä prototyyppiä. Tämä säästää merkittävästi aikaa ja resursseja. (Ptc 2023).

Jotkut ohjelmistot ovat pelkästään CFD-simulointiohjelmistoja, jolloin malligeometria täytyy saada valmiina tai suunnitella jollain erillisellä CAD-ohjelmistolla. Moniin CAD-suunnitteluohjelmistoihin saadaankin lisäosana CFD-ohjelmisto, jolloin voidaan suorittaa koko suunnittelu- ja käytännön testausprosessi yhdessä ja samassa ohjelmistossa. (Karjalainen 2021, 7).

Fluidien virtauksien analysointia varten tarvitaan kolme säilymlakia, jotka ovat massan-, liikemäärän, ja energian säilymlait. Nämä edellä mainitut kolme säilymlakia yhdessä muodostavat Navierin-Stokesin yhtälöt, joihin virtauslaskennan teoria perustuu. Säilymlakien lisäksi tarvitaan myös fluidin aineominaisuudet, kuten tiheys ja kokoon puristumattomuus. (Karjalainen 2021, 11-12).

Tarvittavat kolme säilymlakia voidaan esittää eri tavoin tilanteen mukaan. Käytettävässä lähteessä ne ovat esiteltynä yleisessä muodossa. Alla esiteltynä säilymlait ja aloitamme massan säilymlailla, joka tunnetaan toiselta nimeltään myös jatkuvuusyhtälönä. (Karjalainen 2021, 11-12). Ulkoisen massan lähteen ollessa poissa, kaava saa yleisen differentiaalimuodon:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{v}) = 0, \text{ jossa} \quad \rho = \text{aineen tiheys}$$

$$\vec{v} = \text{nopeus}$$

$$t = \text{aika}$$

∇ = nabla-operaattori, joka kuvaa divergenssiä.

Seuraavaksi on esiteltyä liikemäärän säilymlaki differentiaalimuodossa:

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{v} \otimes \vec{v} + p \vec{I} - \vec{\tau}) = \rho \vec{f}_e, \text{ jossa}$$

p = paine

\vec{I} = neliömomentin tensori

$\vec{\tau}$ = leikkausjännityksen tensori

\vec{f}_e = ulkoiset tilavuusvoimat.

Leikkausjännityksen tensori $\vec{\tau}$ määritellään seuraavasti:

$$\tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \delta_{ij} \right], \text{ jossa}$$

μ = dynaaminen viskositeetti.

Kun liikemäärän säilymlain differentiaalimuodossa olevaa yhtälöä järjestellään uudelleen ja siihen on sijoitettuna leikkausjännityksen tensori, jossa dynaaminen viskositeetti on vakio, saadaan alla esitelty Navierin-Stokesin liikeyhtälö:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} = -\vec{\nabla} p + \mu [\Delta \vec{v} + \frac{1}{3} \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v})] + \rho \vec{f}_e.$$

Viimeisenä on esiteltyä energian säilymlaki:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{v} H - k \vec{\nabla} T - \vec{\tau} \cdot \vec{v}) = w_f + q_H, \text{ jossa}$$

E = fluidin kokonaisenergia

H = fluidin kokonaisentalpia

w_f = ulkoisten tilavuusvoimien työ

q_H = jotakin muuta lämmönlähdettä,

kuin johtumista kuvastava kerroin, esim. säteilyä.

4.2 CFD-simulointiprosessi

CFD-simulointiprosessi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, jotka ovat esikäsittely, simulointi ja jälkikäsittely. Tässä osiossa käymme CFD-ohjelmiston simulointiprosessia läpi yleisellä tasolla. Eri CFD-ohjelmistojen simulointiprosessit eroavat toisistaan, mutta peruseriaate on pitkälti sama. Eriteltyt vaiheet perustuvat opinnäytetyössä käytettyyn NX Flow -ohjelmistoon.

4.2.1 Vaihe 1, esikäsittely

Ensimmäiseksi tarvitaan tietenkin malligeometria eli 3D-malli simuloitavasta kappaleesta. Esikäsittelyvaiheeseen kuuluu sopivan ratkaisijan ja analysointityypin valinta, lähtötietojen-, reunaehtojen- ja analysoitavien ominaisuuksien määrittäminen, virtausalueen määrittäminen sekä laskentaverkoston eli elementtiverkon luominen.

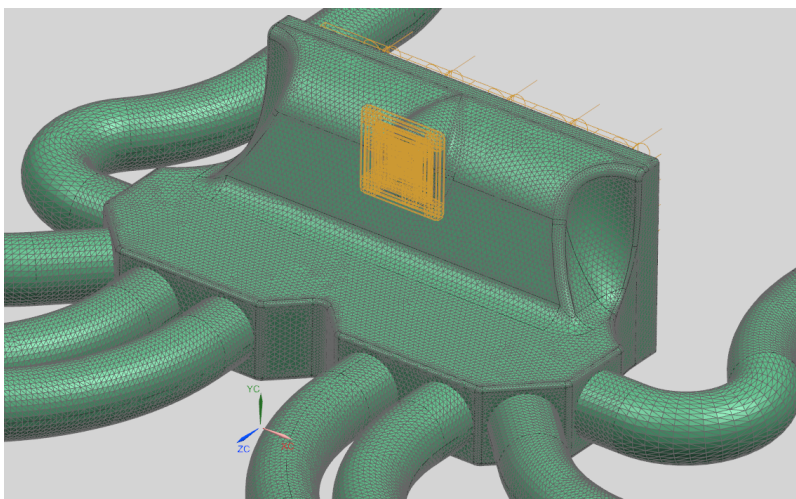
Esikäsittelyvaiheessa tulee määrittää halutut analysoitavat ominaisuudet, kuten virtausnopeudet, paineet, lämpötilat, paine-erot sekä tilavuus- ja massavirrat. Tämän jälkeen tulee simuloitavasta kappaleesta poistaa kaikki kiinteät geometriat ja täyttää ne alueet, joissa fluidin virtausta tapahtuu. Elementtiverkko luodaan täytetyistä alueista koostuneille geometrioille, jolloin saadaan määriteltyä virtausalueet.

Elementtiverkko koostuu muodoltaan mahdollisimman yksinkertaisista elementeistä, kuten kolmioista tai nelikulmioista 2D-geometriassa ja tetraedreistä tai kuutioista 3D-geometriassa. (Karjalainen 2021, 9). Elementit puolestaan määrittelevät solmupisteet, joiden sijainti on ratkaisumallista riippuen jossain elementin alueella tai reunoilla. (Mäkinen 2009, 9).

Diskretisointia käyttäen tutkittavan alueen virtauksesta ei ratkota jatkuvan alueen jokaista pisteen tuntematonta, vaan tyydytäänkin ratkomaan solmupisteiden tuntemattomat. Yhtälöt, jotka ratkaistaan kyseisissä solmupisteissä määräytyvät sen

mukaan mitä ratkaisumallia ja reunaehtoja virtauslaskennassa käytetään. Solmupisteiden ulkopuolisten arvojen selvittäminen tapahtuu solmupisteistä interpoloimalla. (Mäkinen 2009, 9).

Verkotuksen jälkeen tulee määrittää virtaava fluidi ja sen ominaisuudet. Viimeisenä tulee vielä määrittää reunaehdot, joihin kuuluu muun muassa tulo- ja lähtöilmän määrittäminen. Alla olevassa kuvassa (**Kuva 5.**) esiteltynä verkotettu Logsetin vaihtoehoton malli, jossa näkyy myös määritetty sisääntuloilman alue sekä jalkatilan ulostulo.



Kuva 5. Elementtiverkko tetraedrien muotoisista elementeistä.

4.2.2 Vaihe 2, simulointi

CFD-simulointiprosessin toisessa vaiheessa tapahtuu itse simulointi eli tietokoneen laskentaosuus esikäsittelyvaiheessa määriteltyjen tietojen ja ehtojen mukaisesti. Simulointiprosessin laskenta tapahtuu tietokoneen CPU:ssa (central processing unit) tai GPU:ssa (graphic processing unit). (Karjalainen 2021, 9).

Mitä enemmän elementtejä simuloitavassa kokonaisuudessa on eli mitä tiheämpi elementtiverkko, sitä useammassa pisteessä laskut suoritetaan, jolloin saadaan tarkempia tuloksia. Tämä kuitenkin hidastaa prosessia merkittävästi ja vaatii tietokoneelta suurempaa laskentakapasiteettia.

4.2.3 Vaihe 3, jälkikäsittely

CFD-simulointiprosessin viimeinen vaihe on jälkikäsittely. Jälkikäsittelyssä tarkastellaan saatuja tuloksia esimerkiksi erilaisilla simuloinnin luomilla Contour-kuvilla, GIF-animaatioilla tai taulukoilla. Lopuksi saaduista tuloksista kasataan helposti tulkittava esitys, joista halutut asiat ovat yksinkertaista havainnollistaa.

5 TOTEUTUS

Seuraavissa osioissa tarkastelemme lähtötilannetta, josta opinnäytetyötä lähdettiin työstämään ja opinnäytetyön itse konkreettista toteutusta. Opinnäytetyön konkreettinen toteutus voidaan jakaa kahteen osioon, jotka ovat analysointi- ja optimointiosuus.

Optimointiosuudessa tarkastelemme analysointitulosten sekä virtausmekaniikan näkökulmasta optimaalisinta ratkaisua ilman siirtämiseen ilmastointilaitteelta ohjaamoon. Lisäksi optimointiosuudessa valmistui kolme prototyyppiä, joita tarkastelemme lopuksi.

Analysointiosuudessa tarkastelemme NX CFD -simuloinnin antamia tuloksia kaikista kolmesta vaihtoehdoisesta mallista. Tulosten esittämiseen on käytetty simuloinnin luomia Contour-kuvia, Excel-taulukoita ja -kaavioita sekä joitain perus prosenttilaskelmia.

5.1 Lähtötilanne

Työn lähtötilanteena oli kaksi Logset Oy:n valmiiksi suunnittelemaa vaihtoehtoista ilmanjakokoteloja sekä ilmastointilaitteen valmistajan alkuperäinen suorälhtöliitäntä. Lisäksi oli määritetty tilavarausmalli, johon kyseinen malli tullaan sijoittamaan. Käytettävän ilmastointiletkun sisähalkaisija oli pitkälti myös määritelty työn alkutilanteessa, koska suurempaa letkukokoa ei yksinkertaisesti mahduta käyttämään.

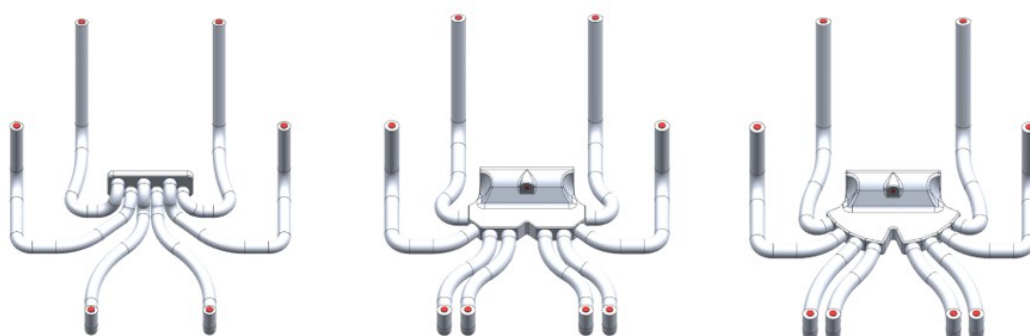


Kuva 6. Vaihtoehtoiset analysoitavat mallit. Vasemmalla lähdöt suorasuuntaisesti, keskellä ympyränmuotoisesti ja oikealla suorälhtöliitäntä.

5.2 Vaihtoehtoiset mallit

Analysointi suoritettiin yllä olevassa kuvassa (**Kuva 6.**) näkyville kolmelle vaihtoehtoiselle ilmanjakokotelon mallille. Kaksi vasemmanpuoleista mallia on Logset Oy:n suunnittelemat vaihtoehtoiset mallit. Ensimmäisessä mallissa on ilmastointiletkujen lähdöt jotakuinkin suorasuuntaisesti ja toisessa taas ympyränmuotoisesti. Näiden kahden mallin yläosassa keskellä näkyvät pienet reiät ovat ohjaamon jalkatillalle menevät lähdöt. Kolmantena vaihtoehtoisena mallina on käytössä olevan ilmastointilaitteen valmistajan alkuperäinen suoralähtöliitäntä.

Jotta simuloinnit vastaisivat mahdollisimman paljon todellisuutta, liitettiin malleihin ilmastointiletkut sekä kuristimet. Kuristimien tehtävä on vastata ohjaamon puhallinsuuttimien aiheuttamaa vastusta, jonka ilmavirta kokee virratessaan järjestelmän läpi. Rajoitettu tila ohjaamossa sekä eri vaihtoehtoisten mallien muodot aiheuttavat letkuihin erisuuruisia mutkia ja kokonaispituuksia, joten niiden liittäminen simulointiin oli hyvin oleellista tulosten luotettavuuden kannalta. Alla olevassa kuvassa (**Kuva 7.**) esiteltynä kokoonpanomallit simulointia varten.



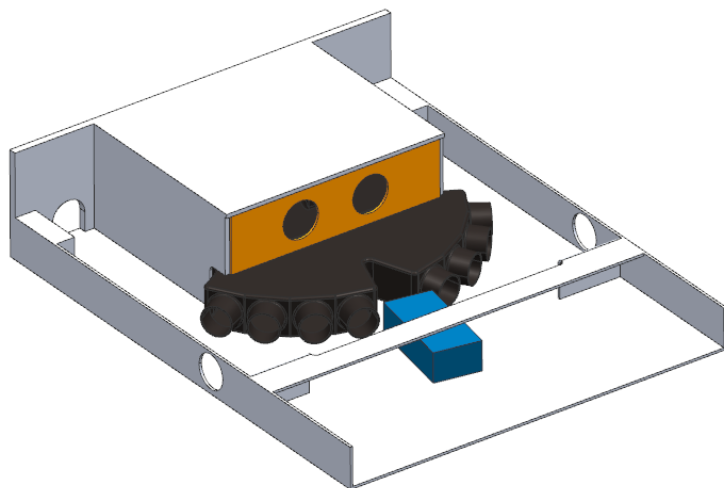
Kuva 7. Vaihtoehtoiset mallit kokoonpanomalleina letkuineen ja kuristimineen.

Mallinnettuihin kuristimiin lisättiin oma User Expression "Kuristimen_sisahalk", jolla pystytään nopeasti määrittämään kuristimien sisähalkaisija syöttämällä haluttu numeerinen arvo valintaikkunaan. Tämän jälkeen muutokset päivittyvät 3D-mallissa.

5.3 Tilavarausmalli

Alla olevassa (**Kuva 8.**) kuvassa on esiteltyä tilavarausmalli, johon ilmanjakokotelo tullaan sijoittamaan. Ahtaat tilat ja valmiiksi määritetyt reitit letkuille sivuilla ja takana tuovat jo itsessään melko paljon geometrisia rajoitteita ilmanjakokotelon suunnittelulle. Näin ollen muotoilun ja koon osalta täytyy pitää huoli, että ilmanjakokotelo mahdutaan asentamaan omalle paikalleen. Ilmanjakokoteloista on ajateltu lähtevän neljä letkua eteenpäin, kaksi sivuille, kaksi taakse ja vielä yksi lähtö ohjaamon jalkatilalle.

Oranssina on irrotettava huoltoluukku, josta ilmanjakokotelo asennetaan paikallensa. Huoltoluukussa olevat kaksi reikää ovat jalkatilan puhallinsuuttimille. Ilmanjakokotelon jalkatilalle lähtevän lähdön perään on suunniteltu tulevan vielä erillinen pieni jakokotelo, josta ilma jakautuu huoltoluukussa oleville puhallinsuuttimille. Tilavarausmallin keskellä oleva sininen suorakulmio kuvastaa jarruventtiilin viemää tilaa. Eteenpäin lähtevät letkut joutuvat kiertämään jarruventtiilin.



Kuva 8. Tilavarausmalli, johon on liitetty ilmanjakokotelo esimerkiksi.

6 ANALYSOINTI

Opinnäytetyön toimeksiantaja Logset Oy halusi, että kolme vaihtoehtoista mallia analysoitaisiin tarkemmin ja selvitetäisiin mikä niistä on kaikkein optimaalisin.

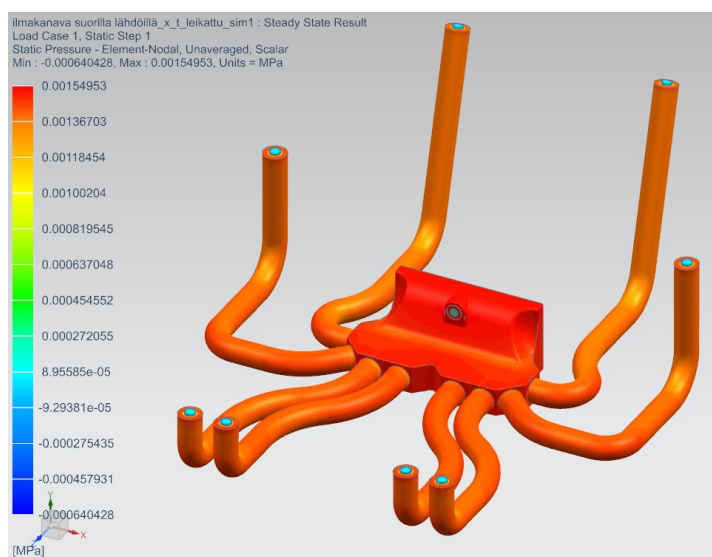
Vaihtoehtoisista malleista tutkittiin painejakaumat, painehäviöt, ilman jakautumista eri letkujen ulostuloille, ilman virtausnopeutta ja käyttäytymistä kanavistossa sekä geometrian aiheuttamia virtausvastuksia.

6.1 Lähdöt suorasuuntaisesti

Ensimmäisenä tarkastellaan Logsetin suunnittelemaa vaihtoehtoista mallia, jossa letkulähdöt lähtevät suorasuuntaisesti.

6.1.1 Paineet ilmanjakojärjestelmässä

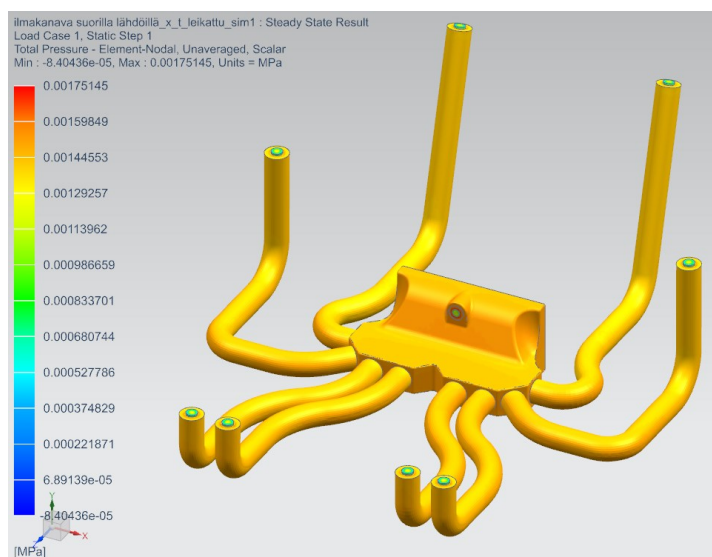
Ensimmäisenä tarkastellaan paineita ilmanjakokotelossa ja siitä lähtevissä letkuissa. Kuten teoriaosuudessa kävimmekin jo läpi, ilmanjakojärjestelmässä esiintyy kahdenlaista painetta, jotka ovat staattinen paine ja dynaaminen paine. Alla olevissa kuvissa (**Kuva 9 ja 10.**) näkyy, kuinka paine jakautuu eripuolille järjestelmää.



Kuva 9. Contour-kuva staattisen paineen jakautumisesta.

Contour-kuvien vasemmassa reunassa näemme asteikon, joka kertoo paineen suuruuden tiettyä väriä kohden. Asteikolla värit siirtyvät kylmemmästä (sininen) lämpimämpään (punainen) paineen kasvaessa.

Näemme, että staattinen paine on suurimmillaan 0.00154953 MPa ja pienimmillään -0.000640428 MPa. Suurin staattinen paine vallitsee ilmanjakokotelossa. Tarkalleen ottaen yläosan pyörityksessä. Staattinen paine laskee, kun siirrytään kohti ilmastointiletken ulostuloja. Pienimmillään se on suuttimien ulostuloilla. Staattinen paine on vastusta, jota ilma kokee liikkeessaan ilmanjakojärjestelmän läpi eli ilmavirta kokee suurinta vastusta ilmanjakokotelossa.



Kuva 10. Contour-kuva kokonaispaineen jakautumisesta.

Yllä olevasta kuvasta (**Kuva 10.**) näemme, että kokonaispaine (staattinen paine + dynaaminen paine) on suurimmillaan 0.00175145 MPa ja pienimmillään -0.000840436 MPa. Suurin kokonaispaine vallitsee myös ilmanjakokotelossa. Tarkalleen ottaen myös ilmanjakokotelon yläosan pyörityksessä, koska ilmavirta kokee äkillisen suunnanmuutoksen heti ilmastointilaitteen jälkeen. Kokonaispaine laskee myös, kun siirrytään kohti ilmastointiletken ulostuloja, jossa se on pienimmillään.

Alla olevasta taulukosta (**Taulukko 1.**) näemme sisääntulon ja ulostulojen staattiset paineet, kokonaispaineet sekä koko systeemin painehäviöt. Tärkeimmät arvot analysoinnin kannalta ovat staattinen paine-ero ja kokonaispaine-ero. Paine-ero on järjestelmässä kahdesta eri pisteestä mitattujen paineiden erotus. Tässä tapauksessa ilmanjakokotelon sisääntulon ja ilmastointiletkujen ulostulojen välinen paine-ero, joka on systeemissä syntynyt painehäviö. Painehäviön laskemiseen käytetään ulostuloilla olevien paineiden keskiarvoa, koska ulostuloja on useita.

Staattinen painehäviö on 1.74888 kPa ja kokonaispainehäviö 0.979798 kPa. Huomataan, että kokonaispainehäviö on pienempi. Tämä johtuu siitä, että dynaaminen paine on aina positiivinen ja staattinen paine voi olla myös negatiivinen.

Staattinen paine sisääntulolla	Staattinen paine ulostuloilla	Staattinen painehäviö
1.51461 kPa	-0.234261 kPa	1.74888 kPa
Kokonaispaine sisääntulolla	Kokonaispaine ulostuloilla	Kokonaispainehäviö
1.53532 kPa	0.55552 kPa	0.979798 kPa

Taulukko 1. Paineet ja painehäviöt.

6.1.2 Ilman jakautuminen eri letkujen ulostuloille

Alempana olevasta taulukosta (**Taulukko 2.**) voimme tarkastella, että kuinka ilma jakautuu eri lähtöjen ulostuloille aikayksikköä kohden. Tätä varten jokaiselta lähdön ulostulolta on määriteltävä virtausnopeus ja massavirta. Virtausnopeudet ovat keskiarvoja, koska virtausnopeus vaihtelee hieman siirtyessään virtauksen poikkipinta-alan keskiosasta ulkoreunaan. Kyseiset arvot ovat kuristavien puhallinsuuttimien kohdalta mitatut eli ohjaamoon puhaltavien ilmavirtojen virtausnopeudet ja massavirrat.

Ilmastoinnin toiminnan kannalta on oleellista, että ilma jakautuu mahdollisimman tasaisesti puhallinsuuttimille eripuolella ohjaamaa. Ulostulot ovat nimetty edestäpäin katsottuna. Huomataan, että virtausnopeus ja massavirta kasvavat hieman

siirtyessä takaletkuilta etuletkuille. Erot ovat kuitenkin hyvin minimaaliset. Massavirta kahdelle etummaiselle letkun ulostulolle on vain 1.44 % suurempi, kuin kahdelle taaimmaiselle. Tämän perusteella voidaan siis todeta, että ilmanjakokotelon sivu- ja takalähdöille ei synny imua ja ilma jakautuu tasaisesti jokaiselle puhallinsuuttimelle.

Taulukosta näemme myös ilmanjakokoteloon tulevan ilmamäärän sekä ulostuloilta poistuvan ilmamäärän aikayksikköä kohden. Erot ovat niin olemattoman pienet, että voidaan todeta sisähalkaisijaltaan 63 mm ilmastointiletkun kapasiteetin riittävän hyvin ilman siirtämiseen.

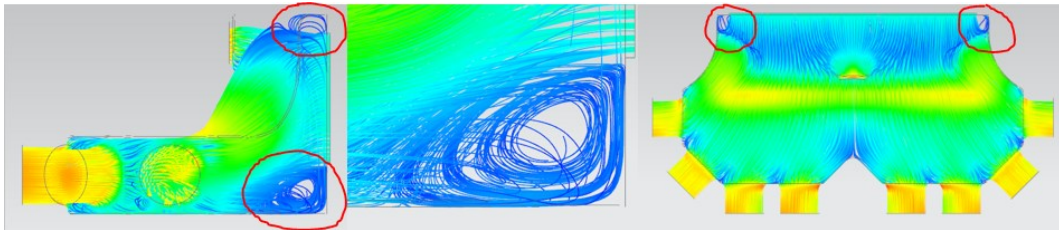
Ulostulo	Massavirta (kg/s)	Virtausnopeus (mm/s)
Ulostulo vasen taka	0.0346745	41266.2
Ulostulo vasen sivu	0.034852	41593.8
Ulostulo vasen etu (ulompi)	0.0349486	41709.8
Ulostulo vasen etu (sisempi)	0.0351996	41947.1
Ulostulo oikea taka	0.0346214	41195.4
Ulostulo oikea sivu	0.0348032	41566.4
Ulostulo oikea etu (ulompi)	0.0349093	41624.4
Ulostulo oikea etu (sisempi)	0.0350951	41820.3
Ulostulo jalkatilaan	0.0163126	43789.3
Sisääntulo kokonais	0.295439	
Ulostulo kokonais	0.295416	

Taulukko 2. Ilman jakautuminen eri lähtöjen ulostuloille.

6.1.3 Ilman virtausnopeus ja käyttäytyminen järjestelmässä

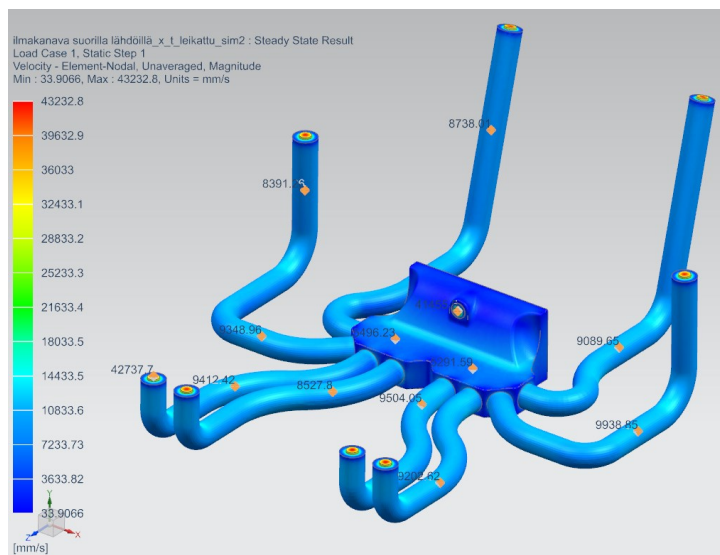
NX CFD -virtaussimuloinnin streamlines-asetus näyttää ilmavirtauksien käyttäytymistä yli 2 000 virtausviivana. Voimme tarkastella miten ilma virtaa ilmanjakokotelon ja letkujen sisällä. Alla olevasta kuvasta (**Kuva 11.**) näemme, että ilmavirrat pyörtelevät ilmanjakokotelon alkuosassa. Tämä johtuu siitä, kun ilmavirrat koh-

taavat 90° kulman virratessaan ilmanjakokotelon sisään. Kulman taakse syntyy alipaine alue, joka aiheuttaa pyörrevirtauksia, jolloin sisääntuloilma jää pyörimään hetkeksi paikalleen.



Kuva 11. Streamlines Contour-kuvia pyörrevirtauksista ilmanjakokotelon alussa.

Alla olevasta kuvasta (**Kuva 12.**) nähdään virtausnopeuksien jakautuminen. Virtausnopeus on suurimmillaan 43 233 mm/s jalkatilaan puhaltavalla ulostulolla ja pienimmillään 34 mm/s ilmanjakokotelon reunoilla. Sisähalkaisijaltaan 63 mm letkuosioissa ilmavirtojen keskimääräiset virtausnopeudet ovat 9 260 mm/s. Tämä on oleellinen tieto, koska virtausnopeus vaikuttaa paljon kitkahäviön suuruuteen. Eripuolille Contour-kuvaa on merkitty virtausnopeuden arvoja.



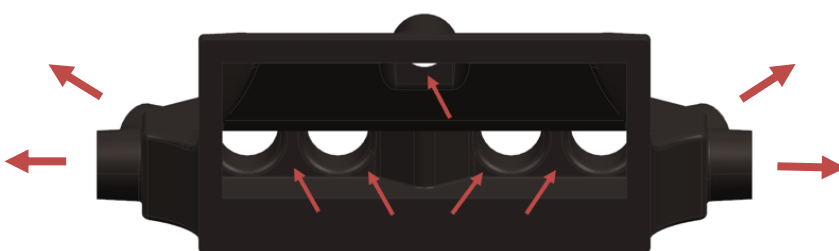
Kuva 12. Contour-kuva virtausnopeuksien jakautumisesta.

6.1.4 Geometrian luomaa vastusta

Ilmanjakokoteloista ja suoralähtöliitännästä lähtevät letkut tekevät useita suunnanmuutoksia ilmavirtaukselle, kuten voimme toteutus osion kuvasta (**Kuva 7.**) havaita. Logsetin kahden vaihtoehdoisen mallin välillä ei letkujen koolla, reiteillä tai ilmanjakokotelon geometrialla ole juurikaan eroa geometristen vastusten osalta. Näin ollen emme tarkastele niitä erikseen ympyränmuotoisilla lähdoillä olevalle ilmanjakokotelolle.

Ilmastointivalmistajan suoralähtöliitännämallissa on kuitenkin merkittävä ero Logsetin kahteen vaihtoehdoiseen malliin verrattuna. Suoralähtöliitännämallissa itse letkut tekevät kaikki suunnanmuutokset ilmastointilaitteen ulostulolta lähtien. Lisäksi letkulähtöjä on vähemmän ja letkujen sisähalkaisija on 55 mm.

Alla olevasta kuvasta (**Kuva 13.**) näemme ilmanjakokotelon geometriasta aiheutuvaa virtausvastusta. Ilmavirta kokee kohtisuoria seinämiä sekä äkillisiä muutoksia virtaussuunnassa. Ilmavirta haluaa aina kulkea suoraan ja kaikki virtaussuuntaa muuttavat geometriset muutokset aiheuttavat vastusta. Kun Ilmavirta kohtaa kohtisuoran seinämän suhteessa virtaussuuntaan, tippuu virtaussuuntaanpäin tapahtuva virtausnopeus noltaan eli pysähtyy hetkellisesti täysin.



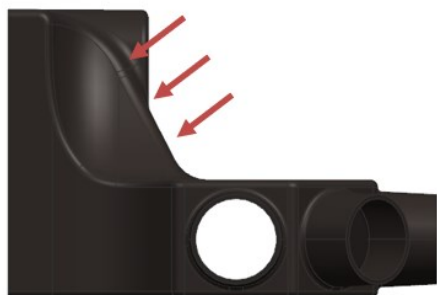
Kuva 13. Virtaussuunnassa tapahtuvaa kohtisuoraa virtausvastusta ja suunnanmuutosta.

Alla olevasta kuvasta (**Kuva 14.**) näemme kuinka sisäänpäin kääntyneet pyöritykset ja 90° kulmat aiheuttavat taskun ilmanjakokotelon sisääntulon molemmin puolin. Tämä geometrian muodostama tasku aiheuttaa ilman pyörteilyä entisestään ja ikään kuin vangitsee ilmaa itseensä.



Kuva 14. Geometrian muodostama tasku.

Alla olevasta sivuttaisprofiilikuvasta (**Kuva 15.**) näemme ilmanjakokotelon yläosassa olevan jyrkän pyörityksen, jossa ilmavirta kokee äkillisen suunnanmuutoksen virtaussuunnassa. Suurimmat staattiset- ja kokonaispaineet johtuvat juuri tästä kyseisestä geometriasta.

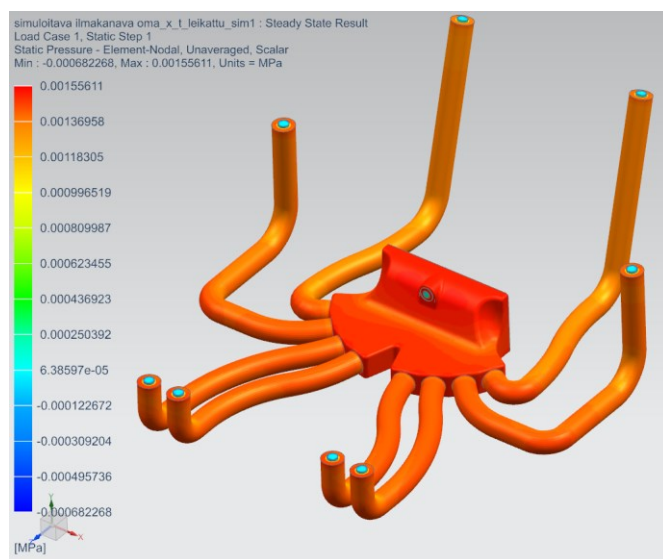


Kuva 15. Sivuttaisprofiilikuva jyrkästä pyörityksestä.

6.2 Lähdöt ympyränmuotoisesti

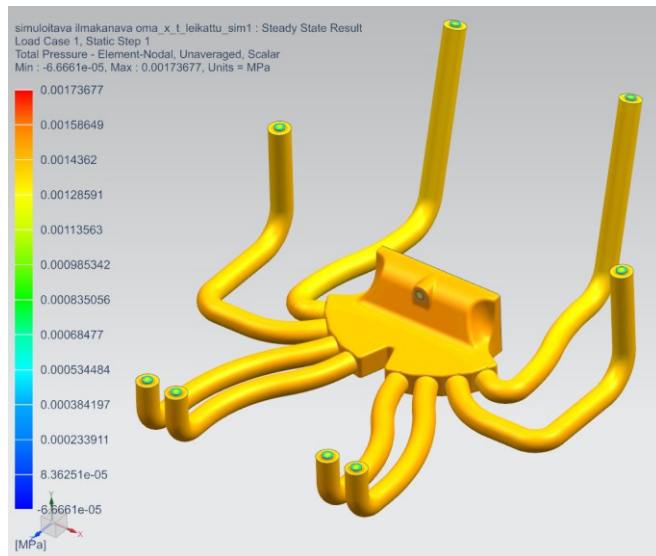
Seuraavaksi tarkastellaan toista Logsetin suunnittelemaa vaihtoehtoista mallia, jossa lähdöt ovat ympyränmuotoisesti. Ympyränmuotoisessa ja suorasuuntaisessa mallissa geometriat ovat identtiset ilmanjakokoteloiden alkuosissa. Pieniä eroja on letkujen lähdöissä ja niiden reiteissä.

6.2.1 Paineet ilmanjakojärjestelmässä



Kuva 16. Contour-kuva staattisen paineen jakautumisesta.

Yllä olevasta kuvasta (**Kuva 16.**) näemme, että staattinen paine on suurimmillaan 0.00155611 MPa ja pienimmillään -0.000682268 MPa. Koska Logsetin vaihtoehtoisten mallien alkuosat ovat identtiset, niin suurimmat paineet vallitsevat samoissa paikoissa eli ilmanjakokotelossa ja tarkalleen ottaen yläosan pyörityksessä. Staattinen paine myös laskee hyvin samankaltaisesti, kun siirrytään kohti ilmastointiletkujen ulostuloja. Pienimmillään se on suuttimien ulostuloilla.



Kuva 17. Contour-kuva kokonaispaineen jakautumisesta.

Yllä olevasta kuvasta (**Kuva 17.**) näemme, että kokonaispaine on suurimmillaan 0.00173677 MPa ja pienimmillään -0.000066661 MPa. Tässäkin suurin kokonaispaine vallitsee ilmanjakokotelossa ja tarkalleen ottaen yläosan pyörityksessä.

Alla olevasta taulukosta (**Taulukko 3.**) näemme sisääntulon ja ulostulojen staattiset paineet, kokonaispaineet sekä koko systeemin painehäviöt. Staattinen painehäviö on 1.73986 kPa ja kokonaispainehäviö 0.973916 kPa.

Staattinen paine sisääntulolla	Staattinen paine ulostuloilla	Staattinen painehäviö
1.50538 kPa	-0.234477 kPa	1.73986 kPa
Kokonaispaine sisääntulolla	Kokonaispaine ulostuloilla	Kokonaispainehäviö
1.52608 kPa	0.552162 kPa	0.973916 kPa

Taulukko 3. Paineet ja painehäviöt.

6.2.2 Ilman jakautuminen eri letkujen ulostuloille

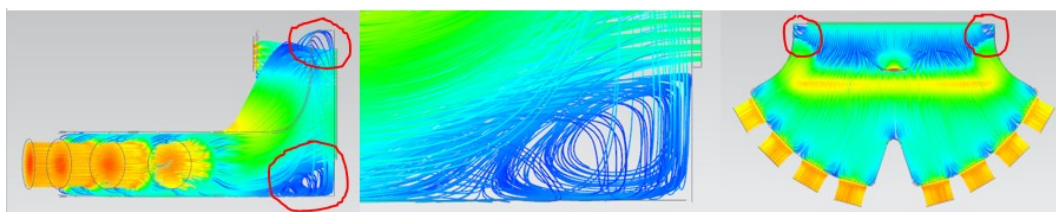
Alla olevasta taulukosta (**Taulukko 4.**) huomataan, että virtausnopeus ja massavirta ovat pienimmillään takaletkuilla ja suurimmillaan etuletkuilla, kuten suorasuuntaisessa mallissa. Sivuille ja eteenpäin (ulommat) lähtevillä huomataan hie-man poikkeavuuksia, mutta erot ovat jälleen hyvin minimaaliset. Massavirta kahdelle etummaiselle letkun ulostulolle on vain 1.72 % suurempi, kuin kahdelle taaimmaiselle. Voidaan siis todeta, että ilma jakautuu tasaisesti jokaiselle puhallinsuuttimelle. Käytettävä letkukoko on sama, kuin aikaisemmassa mallissa. Näin ollen kapasiteetti riittää hyvin ilman siirtämiseen, kuten sisään- ja ulostulojen massavirroista voimme todeta.

Ulostulo	Massavirta (kg/s)	Virtausnopeus (mm/s)
Ulostulo vasen taka	0.0345999	41170.5
Ulostulo vasen sivu	0.0349134	41641.6
Ulostulo vasen etu (ulompi)	0.0348586	41543.6
Ulostulo vasen etu (sisempi)	0.0351908	41896.2
Ulostulo oikea taka	0.0346363	41228.6
Ulostulo oikea sivu	0.0345401	41229.7
Ulostulo oikea etu (ulompi)	0.0350138	41798.1
Ulostulo oikea etu (sisempi)	0.035235	41931.6
Ulostulo jalkatilaan	0.0163258	43863.2
Sisääntulo kokonais	0.295374	
Ulostulo kokonais	0.295314	

Taulukko 4. Ilman jakautuminen eri lähtöjen ulostuloille.

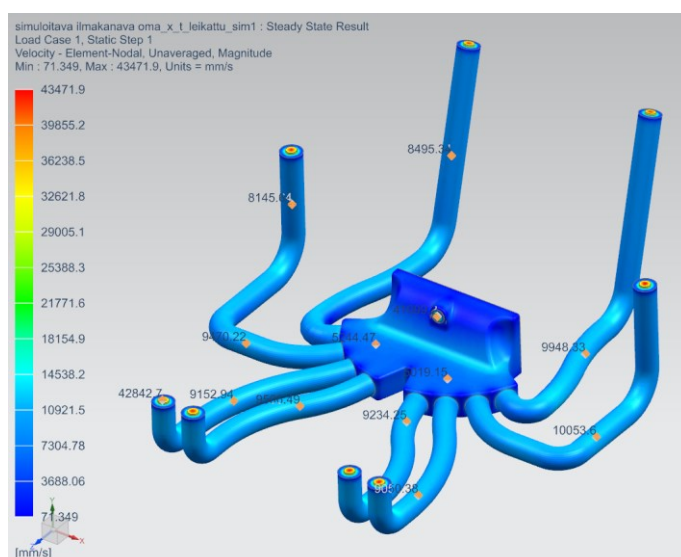
6.2.3 Ilman virtausnopeus ja käyttäytyminen järjestelmässä

Koska ympyränmuotoisessa ja suorasuuntaisessa analysoitavassa mallissa geometriat ovat identtiset ilmanjakokoteloiden alkuosissa, synnyttää se myös identtiset pyörrevirtaukset. Alla olevassa kuvassa (**Kuva 18.**) esiteltynä pyörrevirtaukset.



Kuva 18. Streamlines Contour-kuvia pyörrevirtauksista ilmanjakokotelon alussa.

Alla olevasta kuvasta (**Kuva 19.**) nähdään virtausnopeuksien jakautuminen. Virtausnopeus on suurimmillaan 43 472 mm/s jalkatilaan puhaltavalla ulostulolla ja pienimmillään 71 mm/s ilmanjakokotelon reunoilla. Sisähalkaisijaltaan 63 mm letkuosioissa ilmavirran keskimääräinen virtausnopeus on 9 265 mm/s. Arvot ovat käytännössä samat kuin suorasuuntaisessa mallissa, koska letkukoko ja pituus on lähestulkoon sama.



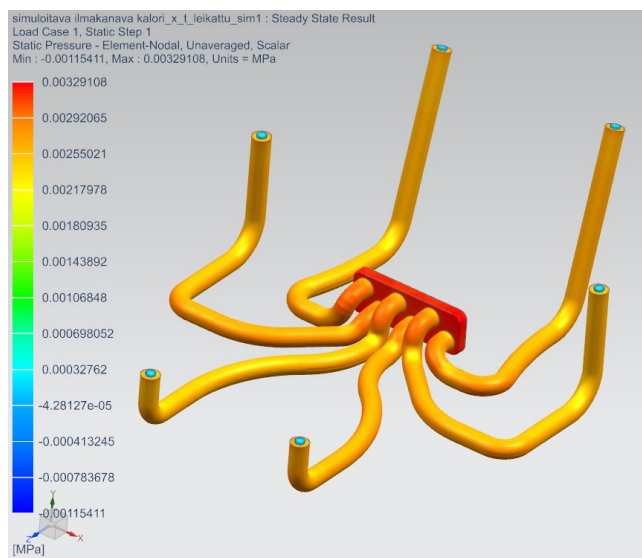
Kuva 19. Contour-kuva virtausnopeuden jakautumisesta.

6.3 Lähdöt suoraliitännästä

Seuraavaksi tarkastellaan ilmastointilaitteen valmistajan suoraliitännää. Suorassa lähtöliitännässä ei ole erillistä jakokoteloä, vaan letkut lähtevät suoraan ilmastointilaitteelta virtausuunnasta kohtisuorassa olevasta liitännästä. Erona myös hieman pienempi letkukoko, joka on 55 mm sisähalkaisijaltaan. Lisäksi suoraliitännästä lähtee vain kuusi letkulähtöä eripuolille ohjaamaa.

6.3.1 Paineet ilmanjakojärjestelmässä

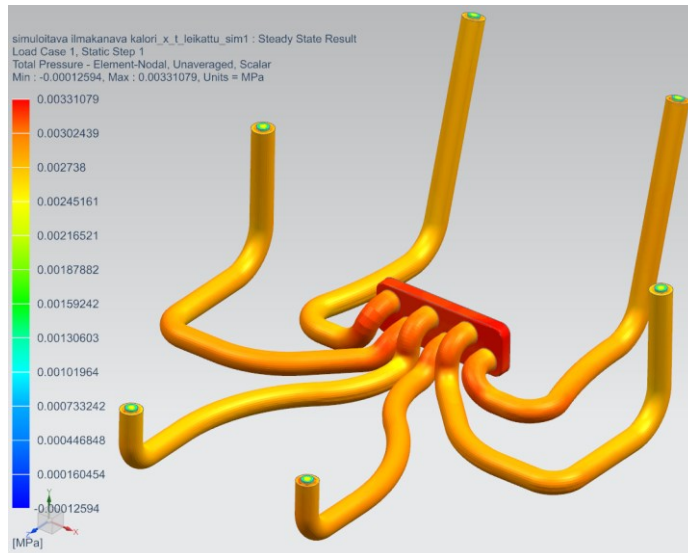
Alla olevasta kuvasta (**Kuva 20.**) näemme, että staattinen paine on suurimmillaan 0.00329108 MPa ja pienimmillään -0.00115411 MPa. Suurin staattinen paine vallitsee suoraliitännän alkuosassa juuri ennen letkulähtöä ja laskee siirtyesään kohti letkujen ulostuloja. Pienimmillään paine on puhallinsuuttimien ulostuloilla.



Kuva 20. Contour-kuva staattisen paineen jakautumisesta.

Alla olevasta kuvasta (**Kuva 21.**) näemme, että kokonaispaine on suurimmillaan 0.00331079 MPa ja pienimmillään -0.00012594 MPa. Suurin kokonaispaine vallit-

see myös suoralähtöliitännän alkuosassa juuri ennen letkulähtöjä ja laskee siirtyessään kohti letkujen ulostuloja. Pienimmillään paine on myös puhallinsuuttimien ulostuloilla.



Kuva 21. Contour-kuva kokonaispaineen jakautumisesta.

Alla olevasta taulukosta (**Taulukko 5.**) näemme sisääntulon ja ulostulojen staattiset paineet, kokonaispaineet sekä koko systeemin painehäviöt. Staattinen painehäviö on 3.65419 kPa ja kokonaispainehäviö 2.0976 kPa. Nämä ovat merkittävästi suurimmat paineet vaihtoehtoisista malleista.

Staattinen paine sisääntulolla	Staattinen paine ulostuloilla	Staattinen painehäviö
3.1892 kPa	-0.464984 kPa	3.65419 kPa
Kokonaispaine sisääntulolla	Kokonaispaine ulostuloilla	Kokonaispainehäviö
3.2062 kPa	1.1086 kPa	2.0976 kPa

Taulukko 5. Paineet ja painehäviöt.

Vaihtoehtoisista malleista ylivoimaisesti suurimmat paineet ovat juuri suoralähtöliitännässä. Tämä johtuu siitä, että ilmapirta kokee suuren kohtisuoran virtausvastuksen virtaussuunnassa juuri ennen letkulähtöjä. Näin ollen suoralähtöliitännän kohdistuva ilmapirtaus kokee täyspysähdyksen virtaussuunnassa. Lisäksi pienemmillä letkukoollla ja määrällä on vaikutusta syntyneisiin painehäviöihin.

6.3.2 Ilman jakautuminen eri letkujen ulostuloille

Alla olevasta taulukosta (**Taulukko 6.**) huomataan, että eri puolien virtausnopeuksilla ja massavirroilla ei ole yhteneväisyyttä, vaan ne vaihtelevat puolelta toisin. Syy tähän on se, että letkulähdöt eivät ole symmetrisesti molemmin puolin. Erot ovat kokonaisuudessaan kuitenkin hyvin pienet ja voidaan todeta, että ilma jakautuu tasaisesti jokaiselle puhallinsuuttimelle. Massavirta oikealle takaletkun ulostulolle on 2.78 % suurempi, kuin oikean sivun ulostulolle.

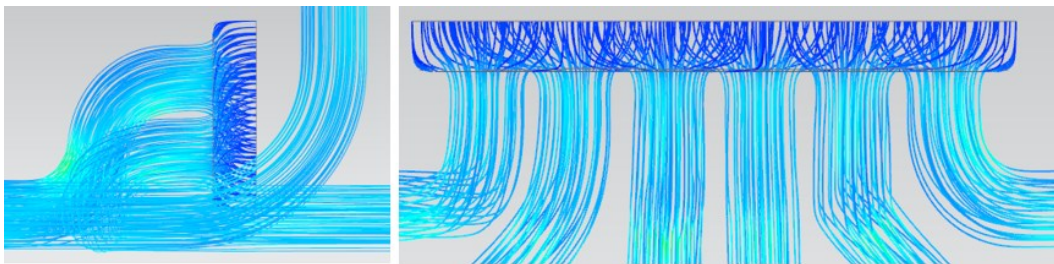
Tässä vaihtoehtoisessa mallissa oli pienempi letkukoko ja määrä, mutta sisään- ja ulostulojen massavirroista voimme todeta kapasiteetin riittävän ilman siirtämiseen myös tällä kombinaatiolla.

Ulostulo	Massavirta (kg/s)	Virtausnopeus (mm/s)
Ulostulo vasen taka	0.0498149	59438
Ulostulo vasen sivu	0.0500403	59766.9
Ulostulo vasen etu	0.0494586	59098.6
Ulostulo oikea taka	0.0508163	60569.6
Ulostulo oikea sivu	0.0494421	58863.9
Ulostulo oikea etu	0.0505819	60302.5
Sisääntulo kokonais	0.300207	
Ulostulo kokonais	0.300154	

Taulukko 6. Ilman jakautuminen eri lähtöjen ulostuloille.

6.3.3 Ilman virtausnopeus ja käyttäytyminen järjestelmässä

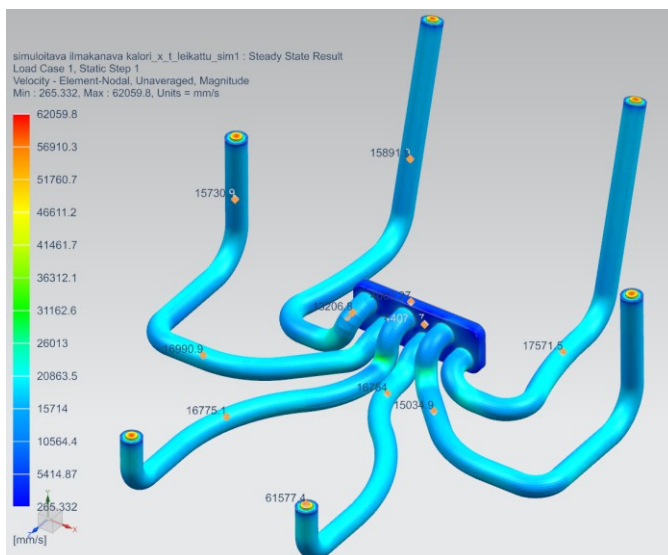
Alla olevasta kuvasta (**Kuva 22.**) näemme kuinka ilmavirrat kohtaavat kohtisuoran virtausvastuksen ja hakeutuvat eri letkulähdöille. Logsetin vaihtoehtoisten mallien kaltaisia pyörrevirtauksia ei synny, mutta ilmavirrat joutuvat tekemään ei toivotuja suuria ja äkillisiä suunnanmuutoksia. Tämä on merkittävin syy suuriin painehäviöihin. Streamlines Contour-kuvista näemme myös, että ilmavirrat kulkevat optimaalisesti letkuissa.



Kuva 22. Streamlines Contour-kuvia suorasta lähtöliitännästä.

Alla olevasta kuvasta (**Kuva 23.**) nähdään virtausnopeuksien jakautuminen. Virtausnopeus on suurimmillaan 62 060 mm/s puhallinsuuttimien ulostuloilla ja pienimmillään 265 mm/s suorälhtöliitännän reunoilla. Sisähalkaisijaltaan 55 mm letkuosioissa ilmavirtojen keskimääräiset virtausnopeudet ovat 17 120 mm/s.

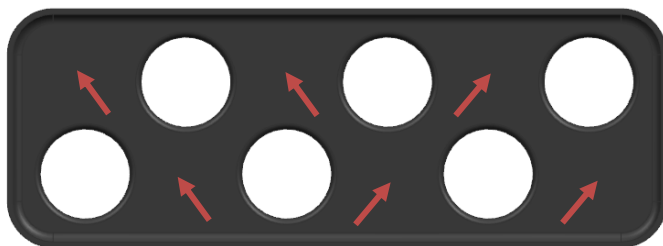
Keskimääräiset virtausnopeudet ovat merkittävästi suuremmat kuin Logsetin vaihtoehdoissa malleissa. Melkein jopa kaksinkertaiset. Tällä on merkittävä rooli myös painehäviöihin, koska virtausnopeudella on suuri vaikutus kitkahäviöihin.



Kuva 23. Contour-kuva virtausnopeuden jakautumisesta.

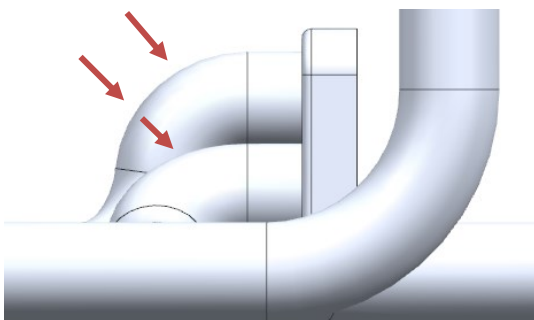
6.3.4 Geometrian luomaa vastusta

Alla olevasta kuvasta (**Kuva 24.**) näemme runsaasti geometriasta aiheutuvaa kohtisuoraa virtausvastusta. Tämä luo erittäin paljon vastusta ilmavirtaukselle, koska se joutuu tekemään äkillisiä suunnanmuutoksia virtaussuunnassa.



Kuva 24. Virtaussuunnassa tapahtuvaa kohtisuoraa virtausvastusta.

Alla olevasta sivuttaisprofiilikuvasta (**Kuva 25.**) näemme suorälhtöliitännän letkuissa tapahtuvat äkilliset mutkat heti letkulähtöjen jälkeen, jossa ilmavirta kokee äkillisen suunnanmuutoksen virtaussuunnassa. Erona Logsetin vaihtoehtoisin malleihin on se, että suunnanmuutokset tehdään kokonaan letkuilla ilmanjakokotelon sijasta.



Kuva 25. Sivuttaisprofiilikuva äkillisestä suunnanmuutoksesta.

6.4 Analysointiosuuden yhteenveto

Analysointiosuuden tulosten perusteella Logsetin kaksi vaihtoehtoista mallia ovat selvästi optimaalisemmat kuin ilmastointivalmistajan suoralähtöliitännät. Ympyränmuotoisilla lähdöillä olevassa mallissa oli pienimmät painehäviöt, mutta suorasuuntaisilla lähdöillä olevassa ilma jakautui kaikista tasaisimmin ulostuloille. Erot ovat kuitenkin niin olemattoman pienet, että molemmat vaihtoehtoiset mallit ovat käytännössä yhtä hyviä.

Sen lisäksi, että suoralähtöliitännä suoriutui analysoinneista kaikista heikoiten, on ongelmana puuttuva lähtö ohjaamon jalkatilalle. Jalkatilalle on tärkeä saada puhallettua talvisin lämmintä ilmaa ja kesällä viileää, jotta kuskin jalat eivät jäädy tai hiko. Vain kuusi letkulähtöä eripuolille ohjaamo ei sinänsä ole ongelma, koska ulostulojen määrää voitaisiin lisätä liittämällä Y-haaroja letkuihin. Kuitenkin suoralähtöliitännän aiheuttamat suuret vastapaineet ajavat alas ilmastointilaitteen kapasiteettia.

Analysointiosuudessa tutkittiin vielä puhallinsuuttimien aiheuttamaa osuutta virtausvastuksista. Eräs ilmastointivalmistaja on puhunut, että puhallinsuuttimien aiheuttama virtausvastus olisi niin suuri, että muun kanaviston virtausvastus olisi siihen verrattuna aika merkityksetön. Näin ollen erillinen ilmanjakokotelo olisi heidän mielestään melko turha toteutus.

Ympyränmuotoisilla lähdöillä olevasta ilmanjakokotelosta ajettiin yksi simulointi ilman puhallinsuuttimien aiheuttamaa kuristusta, jotta voimme verrata tuloksia kuristettuun simulointiin. Tulosten perusteella puhallinsuuttimien aiheuttama osuus staattisesta painehäviöstä on peräti 93.9 % ja kokonaispainehäviöstä 92.3 % tilanteessa, jossa puhallinsuuttimet kuristavat sisähalkaisijaltaan 63 mm ilmastointiletkut sisähalkaisijaan 30 mm. Lisäksi ilmastointilaitetta käytetään täydellä teholla, jolloin puhalluskapasiteetti on 870 m³/h.

Puhallinsuuttimien aiheuttama osuus painehäviöistä vaihtelee näin ollen jatkuvasti ja on riippuvainen useista tekijöistä. Esimerkkitalanteen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että puhallinsuuttimien osuus painehäviöstä voi olla todella merkittävä ja itse kanaviston osuus jää tällöin hyvin pieneksi. Kuitenkin pelkällä ilmanjaon muokkaamisella voimme saada suuriakin eroja aikaiseksi, kuten Logsetin vaihtoehtoisten ja ilmastointivalmistajan suoralähtöliitännän välillä huomasimme.

7 OPTIMOINTIOSUUS

Ilmanjaon optimointia lähdettiin suorittamaan eri simulointitulosten, -havaintojen sekä virtaustekniikan näkökulmasta. Lisäksi rotaatiovalamisen valmistusteknilliset rajoitteet otettiin huomioon prototyyppien suunnittelussa. Haasteellisen suunnittelusta ja optimoinnista tekivät ahtaat ja rajoitetut tilat paikassa, johon ilmanjakokotelo ja letkut tullaan sijoittamaan.

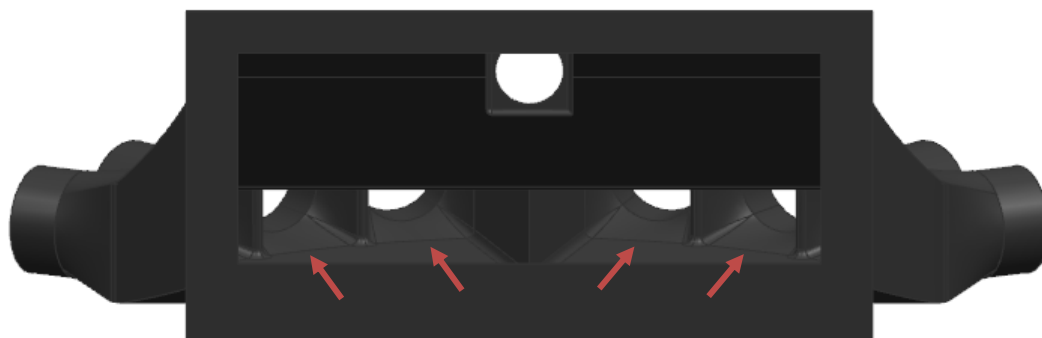
7.1 Ilmanjakokotelon geometria

Analysointitulosten perusteella todettiin, että käyttämällä erillistä ilmanjakokotelo, saadaan paljon pienemmät painehäviöt, kuin alkuperäisellä suorälhtöliitännällä. Näin ollen työssä lähdettiin suunnittelemaan ja optimoimaan erillistä ilmanjakokotelo.

Analysointiosuuden painejakaumien Contour-kuvista huomaamme, että suurimmat paineet kohdistuivat ilmanjakokotelon alkuosassa olevaan jyrkkään pyöristykseen. Ilmavirtaus kokee äkillisen suunnanmuutoksen, jolloin syntyy paljon virtausvastusta. Näin ollen haluamme optimoida alkuosan pyöristyksen niin loivaksi ja virtaviivaiseksi kuin mahdollista.

Ilman virtausnopeus ja käyttäytyminen sekä geometrian luomaa vastusta osioissa tarkastelimme ilmanjakokotelon alkuosassa syntyviä pyörrevirtauksia ja geometrian muodostamia taskuja. Näitä pyörrevirtauksia ja taskuja aiheuttavat geometriat tulee poistaa tekemällä alkuosasta suoraviivaisesti yhtenevä muun geometrian kanssa.

Geometrian luomaa vastusta osion kuvassa (**Kuva 13.**) näkyviä virtaussuunnassa tapahtuvia kohtisuoria virtausvastuksia ei voitu poistaa valmistusteknillisistä syistä. Mikäli valmistusteknillisiä rajoitteita ei olisi niin kyseiset virtausvastukset voitaisiin minimoida alempana olevan kuvan (**Kuva 26.**) mukaisesti.



Kuva 26. Prototyypin 1, jossa neliömäinen muoto sulautuu pyöreäksi.

Ilmastoinnin toiminnan kannalta on tärkeää, että ilma saadaan jaettua eripuolelle ohjaamaa mahdollisimman tasaisesti. Simuloinneista huomataan, että ilmanjakokotelon erisuuntaisista lähdöistä ja erisuuruisista letkumutkista huolimatta ilma osaa jakautua letkujen ulostuloille tasaisesti.

Virtaustekniikan näkökulmasta virtaukset suosivat enemmän pyöreää muotoilua kitka- ja kertahäviöiden kannalta. Totesimme tämän myös Streamlines Contour-kuvasta (**Kuva 22.**), jossa ilmavirrat kulkivat optimaalisesti letkun sisällä. Näiden perusteella virtauksien suunnanmuutokset kannattaa toteuttaa mahdollisimman paljon itse letkuilla eikä ilmanjakokotelolla. Näin ollen kotelon ulkoreunat tulisi olla mahdollisimman suorasuuntaiset ja letkulähdöt suorassa linjassa.

7.2 Letkujen valinta

Tärkeimpiä virtausteknisiä tehtäviä on letkun sisähalkaisijan eli virtauksen poikkipinta-alan määrittäminen. Mitä pienempi letkun sisähalkaisija on, sitä nopeampi virtausnopeus on, koska tilavuusvirta pysyy samana, mikäli letkussa riittää kapasiteettia. Virtausnopeuden kasvaessa myös painehäviöt kasvavat ja järjestelmän suorituskyky heikkenee, koska kitkavoimat suurenevat. Suuret virtausnopeudet lisäävät myös melusaastetta, tärinää, eroosiota sekä kasvattavat turbulenttisia pyörteitä.

Haluamme siis valita mahdollisimman suuren letkukoon ilman siirtämiseen. Kuitenkin geometriset rajoitteet tilavarauksissa rajoittavat käytettävän letkukoon

sisähalkaisijaltaan 63 mm. Näin ollen ainoaksi tavaksi laskea virtausnopeutta jäisi lisäämällä letkujen määrää. Alla olevasta kaavasta voidaan laskea virtausnopeus tietylle letkukoolle/määrälle. Esimerkissä on laskettu Logsetin vaihtoehtoisten mallien keskimääräiset virtausnopeudet letkuissa ja jalkatilaan lähtevässä lähdössä.

$$v = \frac{4 \cdot 0.2416 \text{ m}^3/\text{s}}{(\pi \cdot 0.063^2 \cdot 8) + (\pi \cdot 0.040^2)} = 9.223 \text{ m/s}$$

Yllä olevasta kaavasta voidaan myös kaavaa pyörittämällä selvittää suoraan letkun sisähalkaisija, jolloin voidaan laskea letkukoko suositetulle virtausnopeudelle. Kaava saa muodon:

$$D = \sqrt{\frac{4q_v}{\pi v}}, \text{ jossa } q_v = \text{tilavuusvirta}$$

v = suositeltu virtausnopeus.

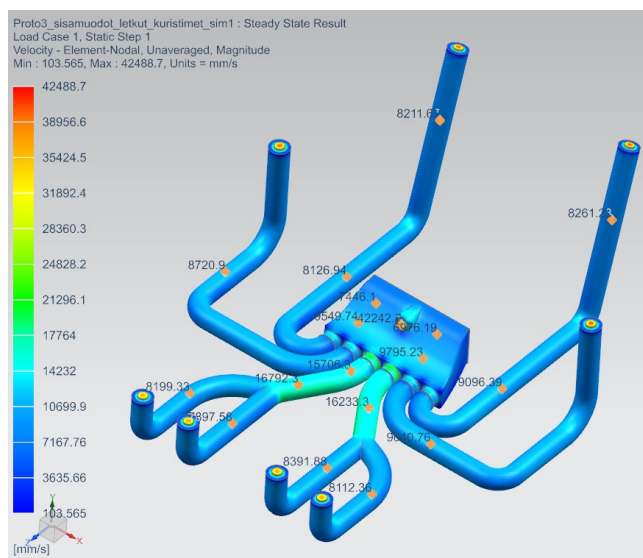
Jotkut lähteet suosittelivat noin 1.5 m/s virtausnopeutta. Jotta kyseinen 1.5 m/s virtausnopeus toteutuisi, tarvittaisiin 8 x 160 mm tai 50 x 63 mm letkua. Letkulähtöjä ei kuitenkaan mahdu juurikaan kahdeksaa kappaletta enempää ilmanjakokoteloon.

Toinen huomioitava asia on letkujen kokonaispituus. Kitkahäviöiden suuruuteen vaikuttaa letkun sisähalkaisijan ja virtausnopeuden lisäksi myös letkujen kokonaispituudet. Teoriaosuuden kitkahäviöiden kaavasta voimme todeta, että virtausnopeuden vaikutus on kuitenkin paljon merkittävämpi, koska se korotetaan toiseen potenssiin. Näin ollen kaikista optimaalisinta olisi mahdollisimman vähän letkuja isolla sisähalkaisijalla ja mahdollisimman lyhyillä kokonaispituuksilla.

7.2.1 Y-haarat letkuissa

Optimointiosuudessa tutkittiin mahdollisuutta lisätä letkujen määrää Y-haaroilla. Tulokset olivat mielenkiintoisia, sillä ilma osaa hakeutua Y-haaroista huolimatta

suhteellisen tasaisesti jokaiselle ulostulolle. Lisäämällä Y-haaroja saadaan ilmanjakotelosta pienempi ja kapeampi, koska lähtöjen määrä vähenee. Alla olevasta kuvasta (**Kuva 27.**) nähdään ilmavirtauksien jakautuminen prototyypissä, jossa on käytetty kahta Y-haaraa. Ilmanjakotelolta lähtevissä kahdessa keskimmaisessä letkussa virtausnopeudet ovat noin 16 500 mm/s ja Y-haarojen jälkeen ne jakautuvat tasaisesti.



Kuva 27. Contour-kuva virtausnopeuden jakautumisesta prototyypissä 3.

7.3 Prototyypit

Prototyyppejä suunniteltiin ja mallinnettiin yhteensä kolme kappaletta. Opinnäytetyön alussa oli suunnitelmana, että valmis prototyyppi tulostettaisiin koulun laboratoriossa, jolloin sitä voitaisiin sovitella ja testaila Logset Oy:llä. Työn edetessä prototyypin tulostamisesta päätettiin kuitenkin luopua yhteisellä päätöksellä.

Prototyypit ovat ensinnäkin liian suuria tulostettavaksi ja ne vaatisivat geometrian takia erittäin paljon tukimateriaalia. Lisäksi perinteisissä pursotustulostimissa ei saavuteta tarpeeksi laadukasta pinnanlaatua käytännön testaamista varten. Jotta pinnanlaatu pysyisi riittävän hyvänä ja tukimateriaaleja ei tarvittaisi, niin ainoa tapa valmistaa prototyypit olisi jauhepetimenetelmään perustuva 3D-tulostus.

Koulun Technobothnian laboratoriossa olisi muutama kyseiseen tulostustekniikkaan perustuva SLS-tulostin, mutta tulostuspedit ovat kuitenkin liian pieniä kyseisille prototyypeille. Logset Oy:n ohjaajat olivat myös sitä mieltä, että prototyyppien tulostus ei toisi yritykselle juurikaan painoarvoa. Lisäksi 3D-tulostaminen ei myöskään ole sarjatuotannon kannalta paras valmistustekniikka ilmanjakokotelolle.

7.3.1 Prototyyppi 1

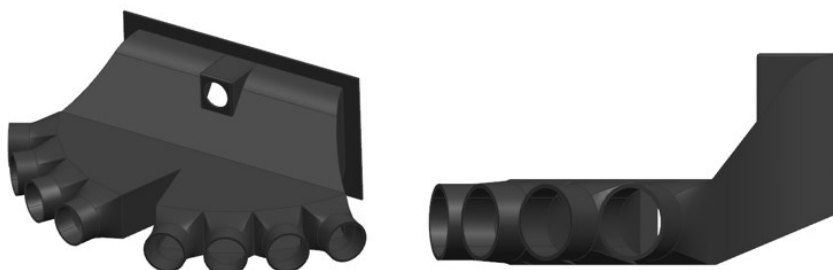
Ensimmäistä prototyyppiä lähdettiin suunnittelemaan ja mallintamaan ympyränmuotoisilla lähdöillä olevan vaihtoehtoisen mallin mukaisesti, koska se oli kaikista kolmesta vaihtoehtoisista malleista analysointitulosten perusteella optimaalisin.

Ilmanjakokotelon alkuosasta on tehty suoraviivaisesti yhtenevä muun geometrian kanssa. Lisäksi kotelon sisällä letkulähtöjen alkuosat sulautuvat neliömäisestä pyöreäksi muodoksi, jolloin saadaan minimoitua virtausvastusta. Tämä esiteltynä kuvassa (**Kuva 26.**) hieman ylempänä.

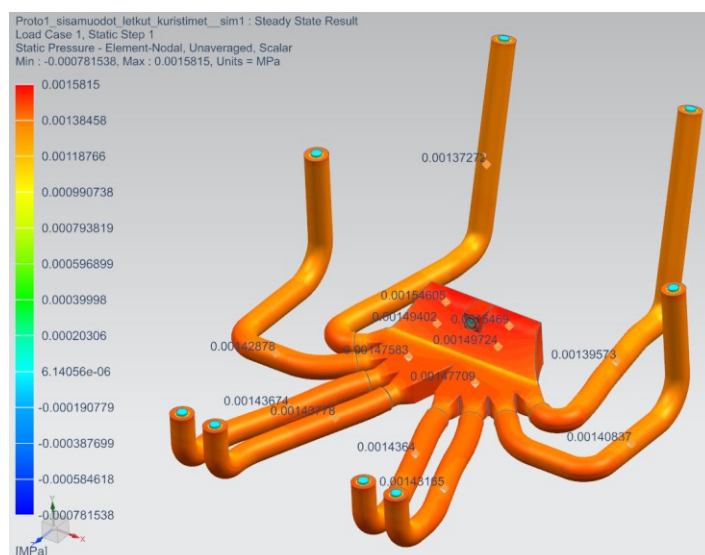
Parannuksista huolimatta prototyyppi 1 painehäviöt ovat hyvin lähellä ympyränmuotoista vaihtoehtoista mallia. Staattinen painehäviö on vain 0,61 % pienempi ja kokonaispainehäviö on 1,52 % pienempi, kuin ympyränmuotoisessa vaihtoehtoisessa mallissa. Ilman jakautuu myös hyvin samankaltaisesti ulostuloille johtuen samantyylisestä geometriasta ja letkureiteistä. Parannuksista ei näin ollen juurikaan ollut vaikutusta suorituskykyyn. Ainoastaan ilmanjakokotelon geometriasta tuli monimutkaisempi ja rotaatiovaluna valmistusteknillisesti liian vaikea valmistettavaksi.

Prototyyppistä 1 olisi voinut saada paremman, mikäli alkuosan pyöritys olisi saatu loivemmaksi ja virtaviivaisemmaksi. Suurin staattinen paine kohdistuu alkuosan pyöritykseen, joka on suurimmillaan 0.0015815 MPa. Tämä on hyvin lähellä ym-

pyränmuotoisilla lähdeillä olevan mallin alkuosan pyöritykseen kohdistuvaa painetta. Prototyyppi 1 ja sen staattinen painejakauma esiteltynä alla olevissa kuvissa (Kuva 28 ja 29.).



Kuva 28. Prototyyppi 1.



Kuva 29. Staattinen painejakauma prototyyppissä 1.

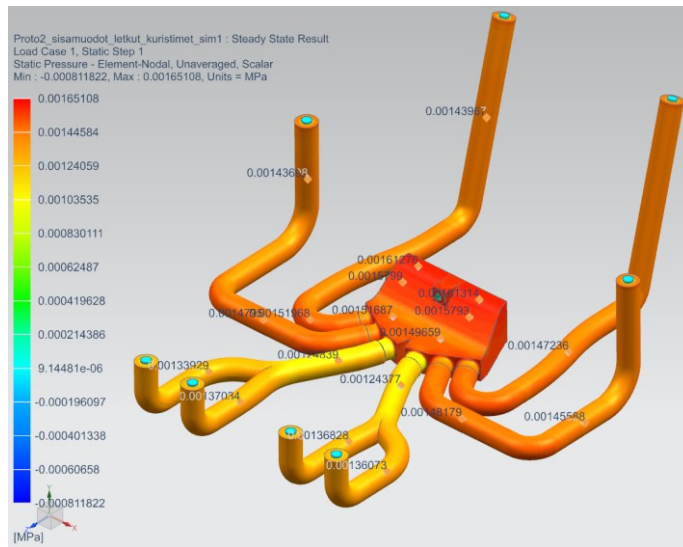
7.3.2 Prototyyppi 2

Prototyyppi 2 ja -3 päätettiin suunnitella vain kuudella letkulähdöllä käyttäen kahta Y-haaraa. Vähentämällä ilmanjakokotelolta lähtevien letkulähtöjen määrää, saatiin kotelosta kapeampi, lyhyempi, suoraviivaisempi ja alkupään yläosan pyörityksestä loivempi. Prototyypissä 2 päätettiin kokeilla viistomaisesti sivullepäin lähteviä letkulähtöjä. Lisäksi alkuosan pyöritystä saatiin hiukan paranneltua optimaalisemmaksi.

Tehtyjen parannusten ja kokeilujen lopputuloksena prototyyppi 2 oli kuitenkin kaikista prototyypeistä suorituskyvyiltään huonoin. Staattinen painehäviö oli 3,97 % suurempi ja kokonaispainehäviö 7 % suurempi, kuin ympyränmuotoisessa vaihtoehtoisessa mallissa. Tämän lisäksi ilma jakautui hieman epätasaisemmin letkujen ulostuloille, johtuen pääosin Y-haaroista. Suuremmat painehäviöt johtuvat alkuosan pyörityksen kohdistuvasta suuresta staattisesta paineesta, joka on suurimmillaan 0.00165108 MPa. Tämä on hieman suurempi, kuin ensimmäisessä prototyypissä ja ympyränmuotoisilla lähdöillä olevissa malleissa. Näin ollen alkuosan pyörityksen suunnittelussa on epäonnistuttu ja tämä vain korostaa sen suurta vaikutusta painehäviöihin. Prototyyppi 2 ja sen staattinen painejakauma esiteltävinä alla olevissa kuvissa (**Kuva 30 ja 31.**).



Kuva 30. Prototyyppi 2.



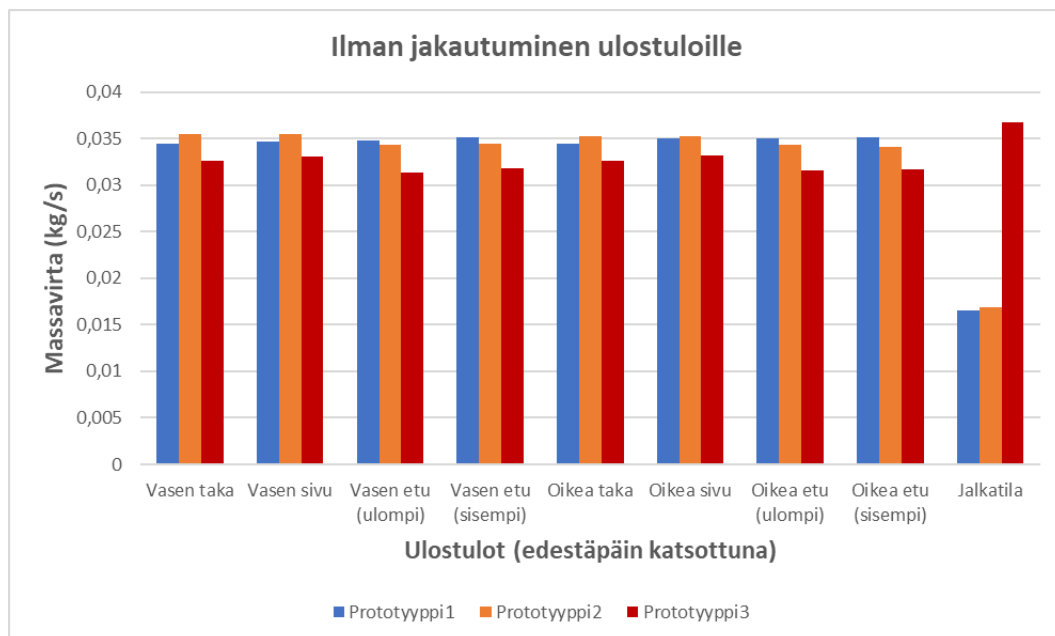
Kuva 31. Staattinen painejakauma prototyypissä 2.

7.3.3 Prototyyppi 3

Aikaisempien tulosten perusteella totesimme useampaan kertaan suurimman vastuksen syntyvän alkuosan pyörityksessä, joten prototyyppi 3 alkuosa suunniteltiin niin loivaksi ja virtaviivaiseksi kuin vain mahdollista. Lisäksi ilmanjakokotelon ulko-reunat ovat mahdollisimman suorasuuntaiset ja letkulähdöt ovat suorassa linjassa. Näin saadaan toteutettua virtauksien suunnanmuutokset mahdollisimman paljon letkuilla eikä itse ilmanjakokotelolla.

Erona kaikkiin muihin malleihin, prototyyppi 3 ilmanjakokotelon alaosan viiste optimoitiin loivaksi pyöritykseksi sulautumaan paremmin yläosan pyörityksen kanssa. Lisäksi jalkatilalle puhaltavaa lähtöä suurennettiin 10 mm. Jalkatilaan puhaltavat puhallinsuuttimet ovat heti jalkatilälähdön vieressä, joten ilman ei tarvitse kulkea pitkää ja mutkikasta reittiä letkuissa eripuolelle ohjaamaa. Näin ollen lisäämällä hieman jalkatilaan puhaltavaa kapasiteettiä vähennetään järjestelmässä syntyvää vastusta. Jalkatilaan ei kuitenkaan haluta liikaa ilmaa, joten lähtöä ei voida suurentaa liikaakaan.

Alla olevassa kuvassa (**Kuva 34.**) on esiteltyä vielä kaikista kolmesta prototyypistä ilman jakautuminen ulostuloille 2-ulotteisena pylväskaaviona.



Kuva 34. Ilman jakautuminen lähtöjen ulostuloille.

7.4 Optimointiosuuden yhteenveto

Tuloksista nähdään, että suorassa linjassa olevilla lähdoilla syntyy pienimmät painehäviöt, mutta ilma jakautuu hieman epätasaisemmin ulostuloille, kuin muissa malleissa. Vastaavasti viistomaisesti ja ympyränmuotoisesti lähtevillä lähdoilla painehäviöt ovat suuremmat, mutta ilma jakautuu hieman tasaisemmin ulostuloille. Erot ovat kuitenkin vain joitain grammoja per sekunti, joten eroa ei käytännössä edes huomaisi metsäkoneen ohjaamossa ollessa.

Optimointiosuudessa onnistuttiin pienentämään kanaviston vastapaineita. Näin ollen voidaan todeta, että ilmastoinnin tehokkuutta on todellakin mahdollista parantaa pelkästään kanavistoa muokkaamalla. Opinnäytetyössä saadut tulokset osoittavat, että erillisen ilmanjakokotelon suunnittelu on kannattavaa. Prototyyppi 3 staattinen painehäviö oli peräti 57.5 % pienempi ja kokonaispainehäviö 58.2 % pienempi, kuin ilmastointilaitteen valmistajan alkuperäisessä suorälähtöliitännässä. Tämä on merkittävä ero, joka on saatu aikaiseksi pelkästään kanavistoa muokkaamalla. On myös hyvä huomioida, että prototyyppiin 3 kuluu vähiten materiaalia kaikista ilmanjakokoteloista. Kaiken kaikkiaan se on optimaalisin, yksinkertaisin ja edullisin ratkaisu.

8 YHTEENVETO OPINNÄYTETYÖSTÄ

Opinnäytetyö oli kokonaisuudessaan mielenkiintoinen ja erittäin opettavainen projekti. Työn alussa minulla ei ollut yhtään kokemusta CFD-virtaussimuloinnista, eikä juurikaan virtausmekaniikasta. Henkilökohtaisena tavoitteenani opinnäytetyössä oli valita jokin aihe, josta ei ollut entuudestaan juurikaan tietämystä, jolloin saisi kehitettyä omaa osaamista mahdollisimman paljon.

Opinnäytetyössä oli omat haasteensa päästä alkuun, koska työtä käsittelevä aihe ja käytettävä CFD-ohjelmisto olivat uusia asioita. Näin ollen kyseisten aiheiden perehtymiseen kului paljon aikaa ennen kuin pääsi aloittamaan itse opinnäytetyötä. Mitään ylitsepääsemättömiä haasteita opinnäytetyössä ei kohdattu ja alkuperäisessä suunnitellussa aikataulussa pysyttiin. Opinnäytetyön toteutus muuttui matkan varrella sen verran, että fyysistä prototyyppiä ei valmistettu.

Yhteistyö toimeksiantaja Logset Oy:n kanssa sujui hyvin. Logsetin ja koulun ohjaajien kanssa järjestettiin säännöllisesti seurantapalavereja, joissa tarkasteltiin työn etenemistä ja saatuja tuloksia. Opinnäytetyön aikana kaikki Logsetin haluamat asiat saatiin selvitettyä ja tehtiin monia mielenkiintoisia havaintoja, joten molemmat osapuolet pääsivät tavoitteisiin. Logsetilta tullut palaute on ollut hyvää, ja he ovat olleet myös tyytyväisiä lopputulokseen.

Haluan vielä kiittää Logsetin ohjaajia Markus Storsjötä ja Jonas Hedströmiä sekä Vaasan ammattikorkeakoulun ohjaajaa Sami Elomaata hyvästä ohjauksesta opinnäytetyön aikana. Tarpeen tullen kysymyksiin ja ongelmiin on saatu todella nopeasti vastaukset ja ratkaisut, joka on mahdollistanut työn sulavan etenemisen. Itse opinnäytetyön aihe valikoitui minulle Sami Elomaan kautta, joten erityiset kiitokset vielä siitä. Tästä onkin hyvä jatkaa kohti seuraavia haasteita ja projekteja.

LÄHTEET

ELDRIDGE, Understanding pressure terminology part 1: Basic terms. Viitattu 14.3.2023. <https://eldridgeusa.com/blog/understanding-pressure-terminology/>

Inkinen, P., Tuohi, J. 2006. Momentti 1: Insinöörifysiikka. Keuruu. Otava.

Karjalainen, A. 2021. Numeerisen virtauslaskennan luotettavuus ja käytettävyys. Tampereen yliopisto.

Kurkinen, M. 2017. VIRTAUSMITTAUKSET Kaasumaisen virtauksen mittaaminen. Centria-Ammattikorkeakoulu.

Logset Oy. Kotisivut. Viitattu 25.4.2023. <https://logset.fi/fi/>

Metropolia, Putkivirtaus. Viitattu 10.4.2023. <https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/4.+Putkivirtaus>

Mäkinen, M. 2009. Työkonemoottorin imusarjan mallintaminen virtauslaskennan avulla. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Ptc, What is CAD. Viitattu 23.4.2023. <https://www.ptc.com/en/technologies/cad>

Rantanen, J. 2019. Lämmitysverkoston laajentamisen virtaustekniset vaikutukset. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

SCIENCE TRENDS, Laminar Vs. Turbulent Flow. Viitattu 25.4.2023. <https://sciencetrends.com/the-difference-between-laminar-and-turbulent-flow/>

SIMSCALE, Fluid dynamics. Viitattu 23.4.2023. <https://www.simscale.com/product/cfd/>

STRESSFIELD, Virtauslaskenta (CFD). Viitattu 23.4.2023. <https://stressfield.fi/erikoisosaaminen/virtauslaskenta-cfd/>

Tec-science, Pressure loss in pipe systems (Darcy friction factor). Viitattu 14.3.2023. <https://www.tec-science.com/mechanics/gases-and-liquids/pressure-loss-in-pipe-systems/>

Wikipedia, Bernoullin laki. Viitattu 29.4.2023. https://fi.wikipedia.org/wiki/Bernoullin_laki

Wikipedia, Computational fluid dynamics. Viitattu 23.4.2023. https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics

Wikipedia, Logset. Viitattu 10.4.2023. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Logset>

Wikipedia, Virtausmekaniikka. Viitattu 10.4.2023. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Virtausmekaniikka>