

Jesse Turpeinen

# Kiertopetikattilan primääri-ilmakanaviston analysointi ja suunnittelu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotanto-

tekniikka

Kevät 2017



KAJAANIN  
AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



## TIIVISTELMÄ

**Tekijä(t):** Turpeinen Jesse

**Työn nimi:** Kiertopetikattilan primääri-ilmakanaviston analysointi ja suunnittelu

**Tutkintonimike:** Insinööri (AMK), kone- ja tuotantotekniikka

**Asiasanat:** koneensuunnittelu, virtuaalituotanto, simulointi, virtausmekaniikka

Opinnäytetyön ensisijaisena tarkoituksena oli parantaa kiertopetikattilan ajettavuutta ja taloudellisuutta. Näiden päämäärien saavuttamiseksi työssä keskityttiin kiertopetikattilan primääri-ilmakanavistossa ja sen puhaltimissa esiintyviin ongelmakohtiin. Suurin ja varteenotettavin ongelma kanavistossa oli rinnakkain samaan kanavistoon asennettuihin primääri-ilmapuhaltimien siipipyöriin kohdistuvat aksiaaliset iskut näitä yksittäin ajettaessa.

Työn suorittamiseen käytettiin apuna Kainuun Voiman dokumentointeja sekä nykyaikaisia 3D- ja virtausmallinnusohjelmistoja. Suunniteltuihin muutoksiin käytettiin lujuuslaskennan eri menetelmiä käsin laskennasta lujuusanalyysiohjelmistoihin. Työn tuloksena suunniteltiin kohteeseen tehtäviä muutostöitä ja siihen valmistettavia komponentteja.

Luotettavuuden kannalta työssä tärkeässä asemassa ovat virtausmallinnoista saadut tulokset. Virtausmallinnuksen tuloksien kannalta nojataan suuresti malliin asetettuihin parametreihin ja mallin geometriaan. Geometrian osalta malli on identtinen kanaviston piirustusten kanssa, joten sen osalta tulokset tulisi olla luotettavia reaalityöntilanteeseen verrattuna. Parametrien osalta simulaatio on pyritty mallintamaan mahdollisimman tarkkaan yrityksen eri dokumentointien perusteella, omien kykyjen ja taitojen rajoissa.

Kanavistossa esiintyvien ongelmien aiheuttajiksi on päätelty kanaviston muotoiluun liittyvät seikat ja tästä johtuvat epämääraisten ja epävakaiden ilmavirtauksien aiheuttamat oireet. Lopulliset tulokset selviävät sitten, kun kanavistoa muutetaan suunnitelmien mukaisesti.

## ABSTRACT

**Author(s):** Turpeinen Jesse

**Title of the Publication:** Analysis and Design of Primary Air Duct System in CFB Boilers

**Degree Title:** Bachelor of Engineering, Mechanical and Production Engineering

**Keywords:** Mechanical engineering, virtual production, simulation, fluid mechanics

The primary purpose of this thesis was to improve CFB boilers (Circulating Fluidized Bed) regarding their controllability and economic efficiency. For achieving these goals, this thesis concentrates on problems in primary air ducts and in their blowers. The biggest and most noteworthy known problem in the duct system was pulsating axial strikes on the impeller wheels of the primary air fans while driving them separately.

Modern CFD (Computational Fluid Dynamics) and CAD (Computer Aided Design) programs and also the documentation of Kainuun Voima were used to accomplish the thesis. Also, the strength of materials in the designed modifications was partially determined by calculating by hand and by FEM calculations (Finite Element Method). The result of the thesis consisted of the designs of the modifications and the components to the primary air duct system.

As to the reliability of this thesis, it leans significantly on the results of the CFD model, which is based on the geometry and parameters set on the model. The model is set identical with the blueprints of the primary air duct system, so it should be reliable compared to the real situations on its part. The parameters used in the simulations are intended to make the situations as real as possible based on the documentation of the company.

It may be concluded that the problems in the primary air duct have been resulted by an unstable and vague airflow caused by its shape and design. The conclusions of the modifications in real situation are not dealt with in this thesis because the modifications are going to be implemented at a later stage.

## ALKUSANAT

Sain opinnäytetyön aiheen ollessani työharjoittelussa Kainuun Voimalla syksyllä 2016. Harjoittelun työtehtävien yhteydessä Kainuun Voiman toimihenkilöiden puolelta tuli kyselyä sekä kiinnostusta virtausmallinnuksiin liittyen. Kainuun Voimalla oli tarve kehittää primääri-ilmapuhaltimia ja erilaisia ratkaisukeinoja oli haettu. Toimihenkilöiltä tulikin toiveita, että olisiko virtausmallinnusta mahdollista tehdä koulun kautta opiskelun yhteydessä. Samassa huomasin, että kyseinen aihe toimisi erittäin hyvin myös opinnäytetyön aiheena. Työstä sainkin tarjolle todella mielenkiintoisen ja suuntaavia opintojani erittäin hyvin tukevan aiheen.

Haluan kiittää opinnäytetyön aiheesta Kainuun Voiman henkilöstöä tuesta ja ohjauksesta paikan päällä toimiessani. Erityisesti haluan kiittää Kainuun Voiman käyttöpäällikkö Kimmo Keinästä sekä käynnissäpitomestari Jouko Leinosta aiheen tarjoamisesta, neuvonnasta sekä opinnäytetyöni ohjaamisesta. Haluan myös kiittää Howden Turbo fans Oy:n aerodynamiikan asiantuntija Joni Tallgrenia erittäin hyvistä neuvoista sekä ohjeistamisesta työhön liittyen. Kiitokset kuuluvat myös opettaja Sami Räsäselle opinnäytetyön ohjauksesta.

Jesse Turpeinen

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	1
2 KIERTOPETIKATTILAN PRIMÄÄRI-ILMANSYÖTTÖ JA KAASUN KIERTO....	3
3 KEHITYSKOHDE .....	6
4 TYÖN TOTEUTUS .....	7
4.1 Mallinnus .....	7
4.2 Simulointi.....	8
4.3 Analysointi ja muutoskokeilut .....	18
4.4 Muutoksien vaikutukset .....	29
4.5 Muutoskohteiden suunnittelu.....	33
5 MUUTOSTYÖN KUSTANNUKSET JA SÄÄSTÖT .....	40
6 YHTEENVETO .....	41
LÄHTEET .....	43
LIITTEET	

## SYMBOLILUETTELO

$C$  = Courantin luku [Laaduton]

$D_e$  = Ekvivalentti halkaisija [m]

$l$  = Virtausta luonnehtiva pituus (Esim. putkessa halkaisija) [m]

$Q$  = Tilavuusvirta [ $m^3/s$ ]

$Q_N$  = Normitettu tilavuusvirta [ $Nm^3/s$ ]

$Re$  = Reynoldsin luku [Laaduton]

$\Delta t$  = Ajan muutos [s]

$V_k$  = Varmuuskerroin [Laaduton]

$\Delta x$  = Aseman muutos [m]

$\beta$  = Lujuuskerroin [Laaduton]

$\sigma_{ver}$  = Vertailujännitys [ $N/m^2$ ]

$\mu$  = Fluidin dynaaminen viskositeetti [ $kg/(s*m)$ ]

## 1 JOHDANTO

Sain opinnäytetyöhöni aiheen ollessani työharjoittelussa Kainuun Voimalla. Opinnäytetyössä käsitellään kiertopetikattilan ilmansyötössä alusta asti esiintynyttä ongelmaa. Opinnäytetyössä simuloidaan ja syvennyttään tutkimaan kiertopetikattilan primääri-ilmakanavien virtauksia, joiden pohjalta mietitään muutoksia ilmakanavien virtauksien tasaamiseksi.

Kainuun Voima on kajaanilainen energiayhtiö, joka on perustettu vuonna 1986. Yhtiö työllistää 34 vakituista työntekijää, joiden tehtäviin kuuluvat muun muassa käyttötehtävät sekä ennakkohuoltotehtävät mekaanisella-, sähkö- ja automaatiopuolella. Työtehtäviin kuuluvat myös työnjohto sekä operatiivinen johto. Kainuun Voiman korjaava kunnossapito ja siivous on ulkoistettu. Kainuun Voiman omistaa UPM Kymmene Oyj sekä Kajaanin kaupunki. Yrityksen toimitusjohtajana toimii diplomi-insinööri Tapio Kakko. Kainuun Voiman omistuksessa on Tihisenniemen kattilalaitos, joka on samalla myös yrityksen päätoimipiste. Kainuun Voiman omistukseen kuuluu myös kolme vesivoimalaitosta; Ämmäkoski, Koivukoski (I ja II) sekä Koivukoski III.

Kainuun Voima tuottaa Kajaanin kaupungille kaukolämpöä ja sähköenergiaa eri tuotantomuodoilla. Tihisenniemellä sijaitseva kattilalaitos tuottaa höyryvoimalla sekä kaukolämpöä että sähköenergiaa. Laitoksella sijaitsee pääkattila sekä varakattila. Pääkattila on Ahlströmin valmistama Pyroflow-kiertopetikattila, jonka teho on 240 MW ja se käyttää polttoaineenaan pääasiassa kotimaisia polttoaineita, kuten turve, hake, kuori ja puru. Kattilalaitoksen varakattila on Tamentecin valmistama, jonka teho on 120 MW ja se käyttää polttoaineenaan raskasta polttoöljyä. Varakattilaa ajetaan pääasiassa pääkattilan huoltoseisakkien ja muiden pääkattilan alasajoa vaativien toimenpiteiden aikana. Kattilalaitoksen vuosittainen energiantuotanto 647 GWh, josta kaukolämmön osalta n. 264 GWh ja sähköntuotannon osalta n. 161 GWh. Kajaaninjoen varressa sijaitsevat vesivoimalat tuottavat sähköenergiaa n. 122 GWh vuositasolla.



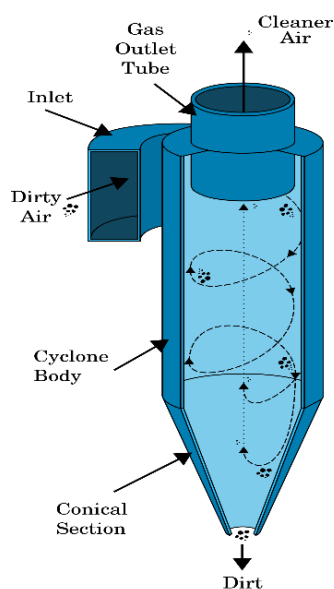
Työssä käsiteltävä ilmavirtauksien analysointi kohdistuu Kainuun Voiman kierto-  
petikattilan primääri-ilmakanavistoon siinä esiintyvistä ongelmista johtuen. Kana-  
vistossa esiintyvä suurin vika liittyy primääri-ilmapuhaltimien käyttöön. Primääri-  
ilmapuhaltimissa on esiintynyt siipipyöriin kohdistuvia suuria aksiaalisia iskuja. Ak-  
siaalisia iskuja syntyy, kun vain toista puhallinta ajetaan ja toinen on pois käytöstä.  
Aiheessa tutkitaan kanaviston ongelmia sekä puhaltimen että itse kanaviston  
osalta.

Työn tavoitteena on pyrkiä etsimään kanaviston ongelmakohdat nykyaikaisia 3D-  
sekä CFD-mallinnusmenetelmiä (Computational Fluid Dynamics) käyttäen. Mah-  
dollisimman tarkkaan simuloitujen tulosten pohjalta pohditaan ratkaisuja kyseisiin  
ongelmatilanteisiin sekä parantamaan muutenkin ilmavirtauksien luonnetta. Rat-  
kaisujen pohjalta suunnitellut muutokset ja niiden vaikutukset kyseisessä järjestel-  
mässä testataan ja analysoidaan kertaalleen. Fyysiset ratkaisut ja muutoskohteet  
suunnitellaan valmistettaviksi asti.

## 2 KIERTOPETIKATTILAN PRIMÄÄRI-ILMANSYÖTTÖ JA KAASUN KIERTO

Kiertopetikattilan primääri-ilmankierto alkaa puhaltimien imupuolelta. Puhaltimien imupuolen putki on asetettu alkamaan rakennuksen ylimmästä kerroksesta asti. Tällä pyritään käyttämään hyväksi laitoksen prosesseissa syntyviä hukkalämpöjä. Lämpimän ilman noustessa ylöspäin on järkevää sijoittaa imupuolen alku ylimmän kerroksen tasalle. Imupuolesta primääri-ilma puhalletaan puhaltimien avulla ilman esilämmittimien läpi kattilan tulipesään.

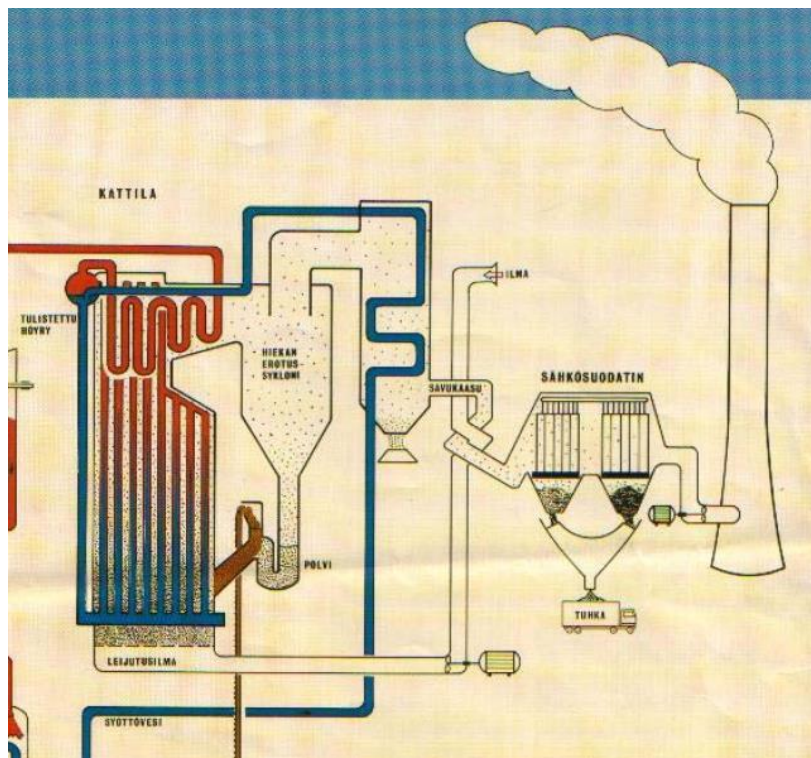
Kiertopetikattilassa kattilan arinalle syötetään useita tonneja leijutushiekkaa. Leijutushiekkaa leijutetaan ilmapuhaltimien avulla ilmassa. Kattilan käynnistysvaiheessa leijuva hiekkapeti lämmitetään usein polttoöljyllä. Hiekkapedin lämmitettyä pedille aletaan syöttää kotimaisia polttoaineita, kuten turvetta, kuorta ja puuhaketta. Hiekkapeti varastoi polttoaineesta saatua lämpöä ja siihen syötetyllä ilmalla tehostetaan palamisreaktiota. Hapen yhtyessä palavan materiaalin hiilen kanssa syntyy kuumia savukaasuja, joista lämpö pyritään ottamaan mahdollisimman pitkälle talteen prosessissa. Kiertopetikattilassa palamattomat tai huonosti palaneet hiukkaset sekä mahdollisesti savukaasun mukana kulkeutunut hiekka pyritään erottelemaan savukaasuista syklonin avulla ja palauttamaan ne takaisin palamisprosessiin kattilan tulipesään. (Kuva 1.)



Kuva 1. Syklonin periaatekuva. [1.]

Savukaasuista otetaan talteen lämpöenergiaa neljässä eri vaiheessa. Ensiksi lämpöenergia otetaan talteen kattilan seinämiin asennetuilla elementeillä, joissa painestettu vesi höyrystyy. Seuraavaksi savukaasut ohjataan tulistimien läpi, jossa virtaa kennoelementeillä höyrystetty korkeapaineinen vesihöyry. Tässä vaiheessa tulistimen putkistossa oleva korkeapaineinen vesihöyry tulistuu. Tulistimien jälkeen savukaasut ohjataan ekonomaiserin eli syöttöveden esilämmittimen läpi, jossa syöttövesi lämpenee lähemmäksi höyrystymislämpötilaansa. Syöttövesi on siis kattilan elementteihin syötettävää vettä ennen sen höyrystämistä.

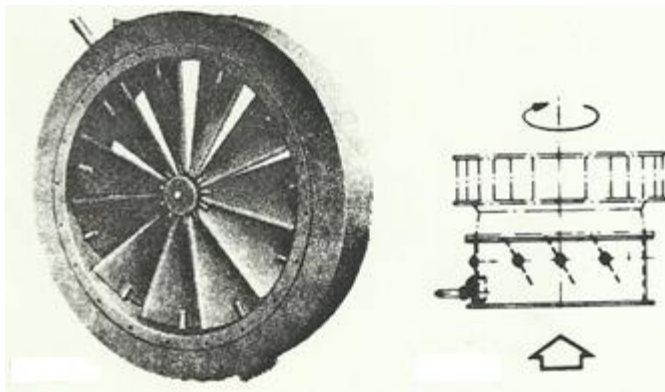
Viimeiseksi lämpöä otetaan talteen luvolla eli palamisilman esilämmittimellä. Ilmaluvo on pyöreä kennomainen rakenne, joka on jatkuvassa pyörimisliikkeessä. Luvo on usein jaettu kolmeen kanavistoon savukaasuja sekä primääri- ja sekundääri- ilmoja varten. Savukaasut lämmittävät luvon kennoa sen läpi mennessään. Luvon lämmenneen osan tullessa ilmanavien kohdalle syötettävä ilma esilämmittyy sen läpäistessään. Lämpöä talteenottavien vaiheiden jälkeen savukaasut ohjataan sähkösuodattimeen, missä siitä erotellaan viimeiset pienhiukkaset ja ohjataan edelleen laitoksen savupiippuun. (Kuva 2.)



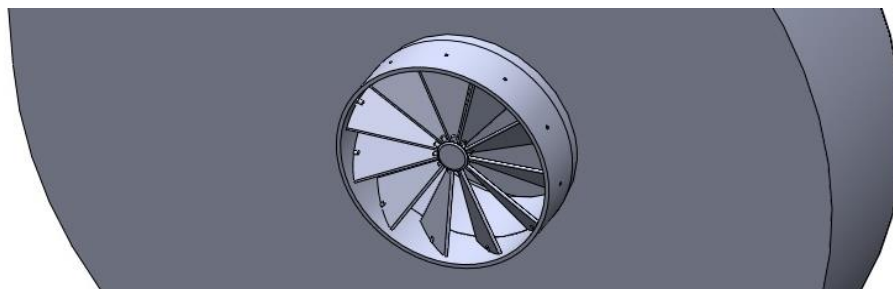
Kuva 2. Kiertopetikkattilan havainnekuva. [2.]

Prosessiin tuotava palamisilma syötetään erilaisia puhaltimia käyttäen. Yleisesti primääri-ilmapuhaltimena käytetään radiaalipuhallinta. Radiaalipuhaltimen toimintaperiaate on hyvin yksinkertainen. Sähkömoottori pyörittää siipipyörää yleensä vakiokierrosnopeudella. Siipipyörän pyöriessä näennäinen keskipakovoima pakottaa ilmaa siirtymään siipipyörän keskeltä ulkokehälle. Radiaalipuhaltimen tilavuusvirtaa säädetään vakiokierrosnopeuden tapauksessa siipisäätimellä. Siipisäätimen tehtävä on myös saattaa ilmavirta siipipyörän pyörimissuunnan myötäiseen pyörteeseen. Siipisäätimen siipikulmia auki säätämällä tilavuusvirta puhaltimen läpi kasvaa. Siipisäätimen lapakulmaa kuvataan tavallisesti prosentteina. Säätimen ollessa täysin auki on se prosentuaalisesti lausuttuna 100 %.

Kainuun Voiman primääri-ilmapuhaltimina toimii kaksi Suomen Puhallintehtas Oy:n (Nykyisen Fläkt woods Oy:n) valmistamaa HACB-100-244-02-6-1 -mallista radiaalipuhallinta. Puhaltimissa käytetään taaksepäin kaartuvia siipipyöriä. Puhaltimiin on asennettu myös Fläktin HXAG-100-1-2 -malliset siipisäätimet. (Kuvat 3 ja 4.) Puhaltimista löytyy lisää kuvia liitteestä 2.



Kuva 3. Fläktin HXAG-100-1-2 Siipisäädin ja sen siipien kätisyys siipipyörän pyörimissuuntaan nähden.



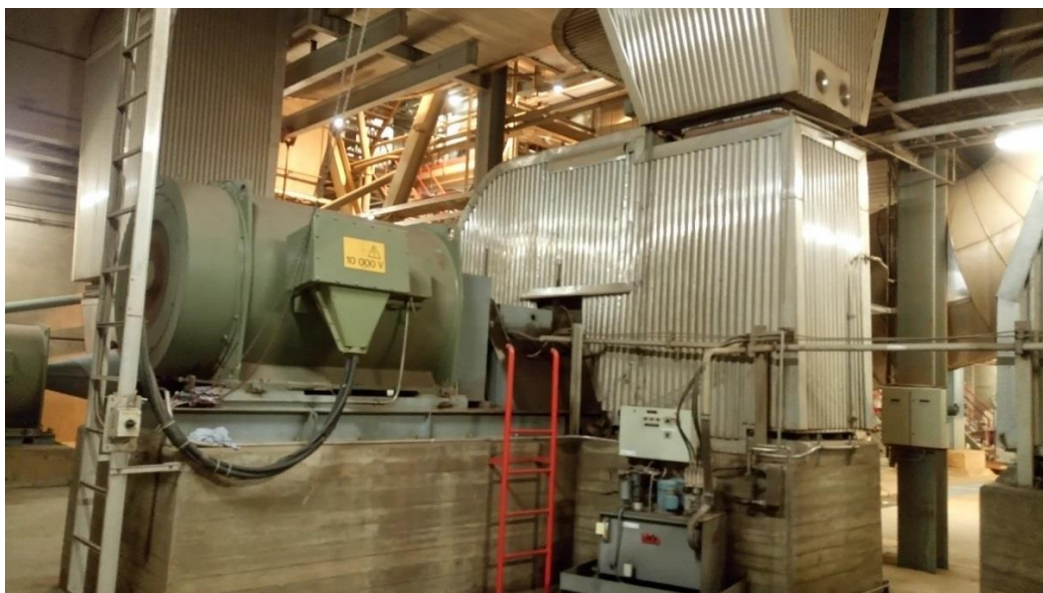
Kuva 4. Siipisäädin 3D-mallissa.

### 3 KEHITYSKOHDE

Primääri-ilmapuhaltimissa esiintyvä ongelma on ollut puhaltimien hankinnasta saakka. Primääri-ilmapuhaltimina toimivat radiaalipuhaltimet on kytketty rinnan samaan kanavistoon sekä imu- että painepuolelta. Molempien puhaltimien ollessa päällä ongelmaa ei esiinny. Kun toinen puhaltimista sammutetaan, alkaa käytössä oleva puhallin tehdä aksiaalisia iskuja. Tämä rajoittaa puhaltimien käyttöä, koska puhaltimien laakerointi on vaarassa rikkoontua. Iskut heikkenevät, jos puhaltimen siipisäädin asetetaan täysin auki.

Puhaltimet ovat tehoiltaan 1160 kW, ja niiden kierrosnopeudet ovat käytössä vakiot 1480 rpm. (Kuva 5.) Mikäli primääri-ilmat saataisiin tuotettua yhdellä puhaltimella, käyttökustannuksissa voitaisiin säästää. Myös puhaltimien käyttövarmuus parantuisi, koska toisen puhaltimen rikkoutuessa olisi mahdollista ajaa laitosta vielä toisella puhaltimella.

Kainuun Voiman pääkattilaan on tehty muutostyö, jolla pyritään pienentämään höyryntuottoa vähentyneen tuotantotarpeen takia. Renforsin rannassa sijainnut paperitehdas tarvitsi ennen sulkemistaan runsaasti höyryä Kainuun Voimalta omaan prosessiinsa. Nyt kun paperitehdas on suljettu, on Kainuun Voiman pääkattila käytännössä ollut ylimitoitettu nykyiseen tuotantotarpeeseen nähden.

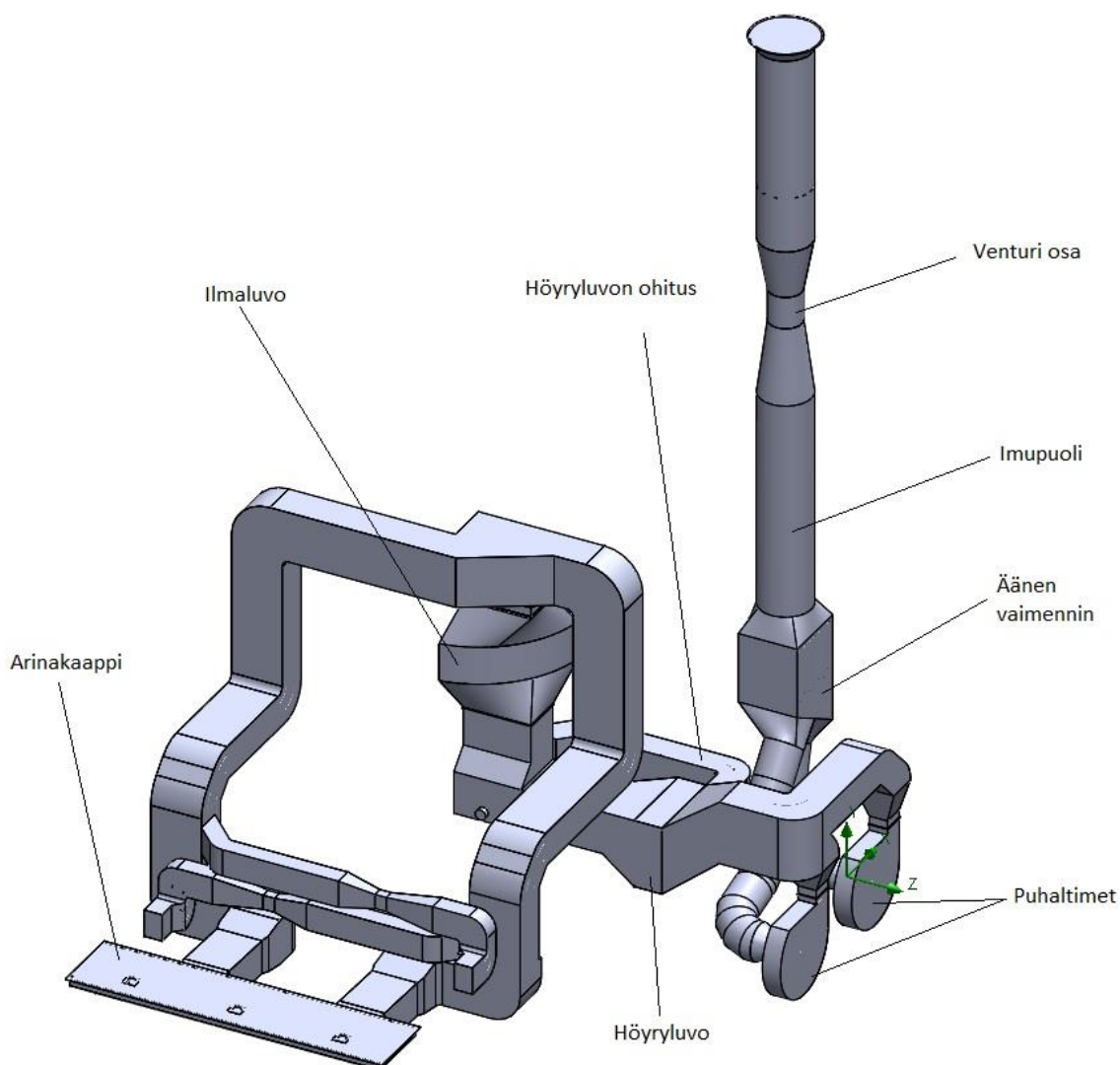


Kuva 5. Primääri-ilmapuhallin Kainuun Voimalla.

## 4 TYÖN TOTEUTUS

### 4.1 Mallinnus

Mallinnus toteutettiin Solidworks 3D-mallinnusohjelmistolla Kainuun Voimalta saatujen piirustuksien pohjalta. Kaikkiin mallin osiin ei ollut tarkkoja piirustuksia, vaan ne täytyi mallintaa omien mittaustulosten ja annettujen tietojen pohjalta. Osapiirustukset mallinnettiin pintamallinnusmenetelmällä, jotka muutettiin lopuksi solideiksi thicken toiminnon avulla. (Kuva 6.)



Kuva 6. Kanaviston 3D-mallinnus.

Primääri-ilmakanaviston malli rakennettiin kanavapiirustusten mukaisista osapiirustuksista, jotka liitettiin lopuksi toisiinsa kokoonpanossa. Kokoonpanoon lisättiin kanavasulkuja kuvaavat sulkulevyt, jotka voitiin ottaa ohjelmassa pois käytöstä aina tilanteen mukaan. Siipisäätimet mallinnettiin omana alikokoonpanonaan ja sen lavat asetettiin säädettäväksi myöhempää simulointia varten.

Mallinnusvaiheessa malliin tuli myös lisätä geometriaa, jota käytettiin simulointivaiheen eri parametrien syöttöön. Näitä olivat muun muassa siipipyörille syötettävä pyörimisliikettä määrittävä rotating region, ilma- ja höyryluvolle syötettävä ilmanvirtausta vastustava porous medium sekä imuputken päähän ja arinakaappiin lisättävä rajaehtoja kuvaava boundary conditions. Myös puhaltimien ympärille tehtiin geometriaa, jota voitiin käyttää simulointiverkon tarkennus alueen parametrina. Kyseisistä parametreista kerrotaan tarkemmin simulointiosiossa.

## 4.2 Simulointi

Simulointiin tuli syöttää tilanteen mukaisia alkuehtoja, joiden pohjalta ohjelma laski virtauksia. (Kuva 14.) Ohjelma tarvitsi heti alkuun määritteen virtauksen luonteesta. Virtauksesta tuli tietää, onko fluidin virtaus turbulenttista vai laminaarista. Tämän määrittämiseksi tuli jo alkuvaiheessa tietää primääri-ilman käyttöarvoista eri tilanteissa.

Virtauksen luonteen pystyy päättämään Reynoldsin lukua apuna käyttäen. Reynoldsin luku määrytyy kaavan 1 mukaisesti. Reynoldsin luku kertoo fluidin hitautta kuvaavien voimien ja sen viskositeetistä johtuvien liikettä vastustavien voimien suhteesta. [3, s. 310.]

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} \quad (1)$$

Reynoldsin luvun mennessä yli 4000:n virtauksen luonne on turbulenttista. Luvun ollessa alle 2000 virtauksen luonne on laminaarista. Näiden lukujen välillä virtauksen luonnetta kutsutaan transitionaaliseksi, eli virtaus on osaksi laminaarista ja osaksi turbulenttista. (Kuva 7.)



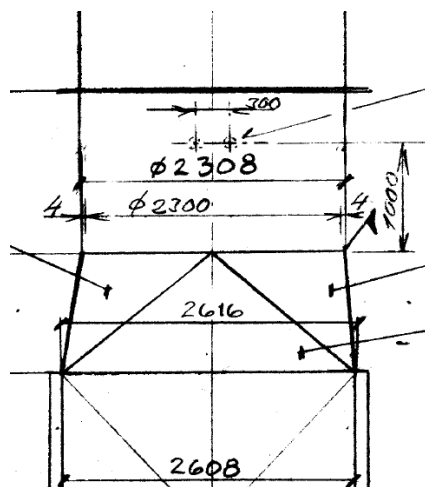
Kuva 7. Laminaarinen, transitionaalinen ja turbulenttinen virtaus. [3, s11.]

Reynoldsin luvun käyttäytymistä tuli miettiä eri tilanteissa, jotta virtauksen luonne saatiin määritettyä ohjelmaan. Esimerkiksi molempien puhaltimien ollessa päällä reynoldsin luku on suurempi kuin käytettäessä yhtä puhallinta. Helpoimmin tämän pystyi määrittelemään etsimällä ääritilanteen.

Tilanteessa missä tilavuusvirta on pienimmillään, tarkastellaan kanaviston osuutta, missä on pienin mahdollinen virtausnopeus. Tilavuusvirraltaan pienin tilanne on tietenkin yhtä puhallinta käytettäessä. Enää tuli määrittää kanaviston kohta, missä virtausnopeus on pienimmillään. Sijoittamalla virtausnopeus tilavuusvirran avulla Reynoldsin kaavaan huomataan, että kanavan suurimmalla leveydellä Reynoldsin luku on pienimmillään kaavan 2 mukaisesti.

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{\rho l}{\mu} * \left( \frac{Q}{\pi r^2} \right) = \frac{\rho l}{\mu} * \left( \frac{Q * 4}{\pi l^2} \right) = \frac{4 \rho Q}{\mu \pi l} \quad (2)$$

Laskussa ei kannata käyttää kennostoituja osia, kuten höyry- ja ilmaluoa, koska ilmavirran leveys ei ole tällöin sama kuin kanavan leveys. Myöskään äänenvaimentimen kohtaa ei kannata huomioida sen sisältämistä äänenvaimennuselementeistä johtuen. Kanavan suurin leveys löytyy imupuolen kanavasta ennen äänenvaimenninta. Kanavan leveys on tässä kohtaa 2300 mm. (Kuva 8.)



Kuva 8. Imupuoli ennen äänenvaimenninta.



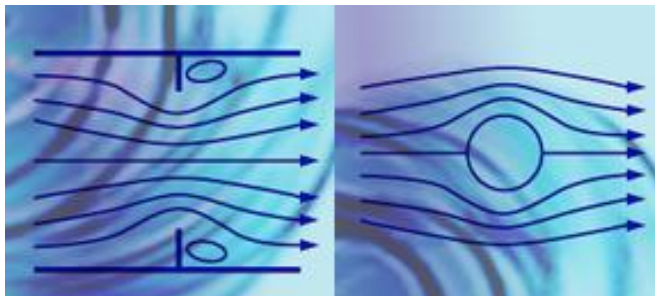
Kaavassa 3 käytetty tilavuusvirta on yhden puhaltimen käyttöalueen alarajalta. Ilman dynaaminen viskositeetti ja tiheys on oletettu olevan 308 K lämpötilassa ja 101,3 kPa paineessa. (3, s. 948.)

Reynoldsin luku tässä kohtaa on näin ollen:

$$R_e = \frac{4\rho Q}{\mu\pi l} = \frac{4 \cdot \frac{1,145 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m}^3}{\text{m}^3 \cdot \text{s}}}{\frac{1,895 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}{\text{ms}} \cdot \pi \cdot 2,3 \text{ m}} \approx 334,5 \cdot 10^3 \quad (3)$$

Ilmavirtaus on siis tässä kohtaa kanavaa turbulenttista. Voidaan siis päätellä, että jos kyseisessä tilanteessa ilmavirtauksen luonne on turbulenttista, täytyy sen olla myös suurempi tilavuusvirtaisissa tilanteissa. Esimerkiksi kun toinen puhallin otetaan käyttöön, niin ilmavirtauksen nopeus kasvaa, jolloin virtauksen luonne muuttuu yhä turbulenttisemmaksi.

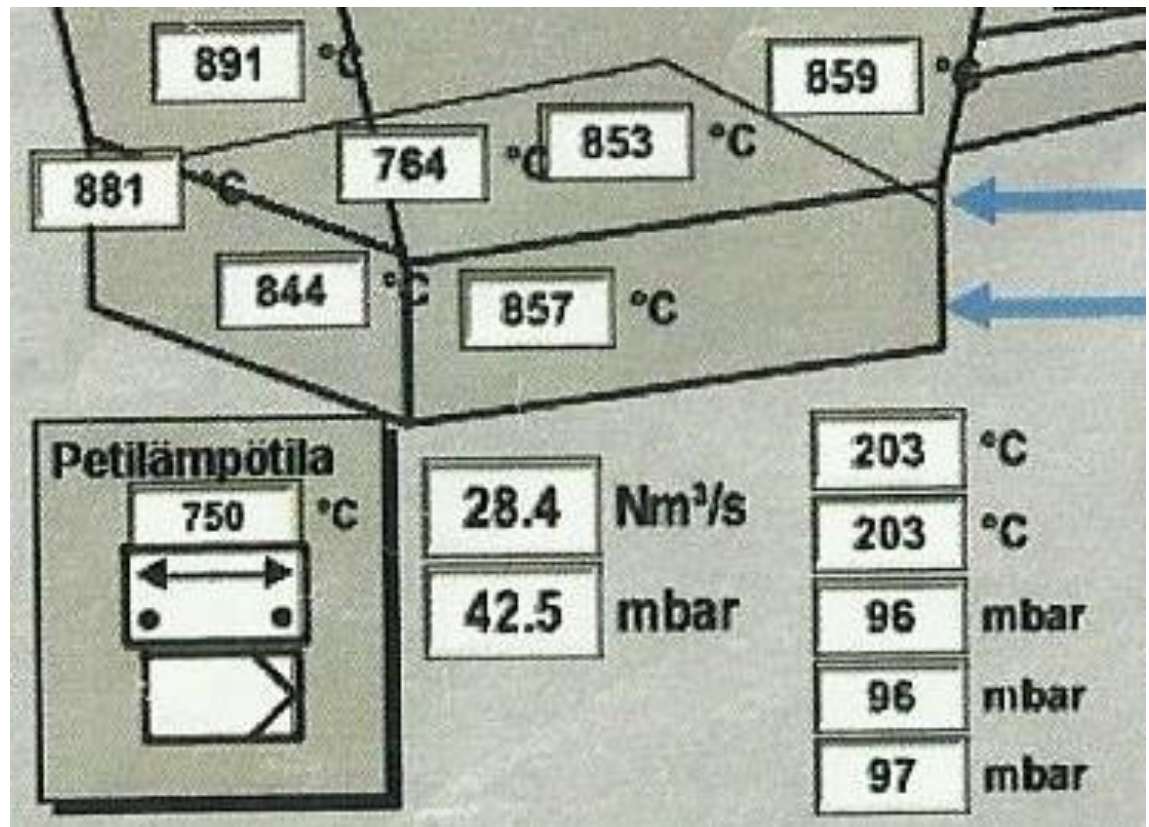
Malliin tuli myös asettaa virtausmallinnuksen tyyppi, jolla määritettiin, onko mallinnus sisäinen vai ulkoinen virtausmalli. Mallinnustyyppillä tarkoitetaan ilman virtauksen sijaintia geometrinen kappaleiden suhteen. (Kuva 9.)



Kuva 9. Sisäisen ja ulkoisen virtaustyyppien havainnekuvat SolidWorks ohjelmassa.

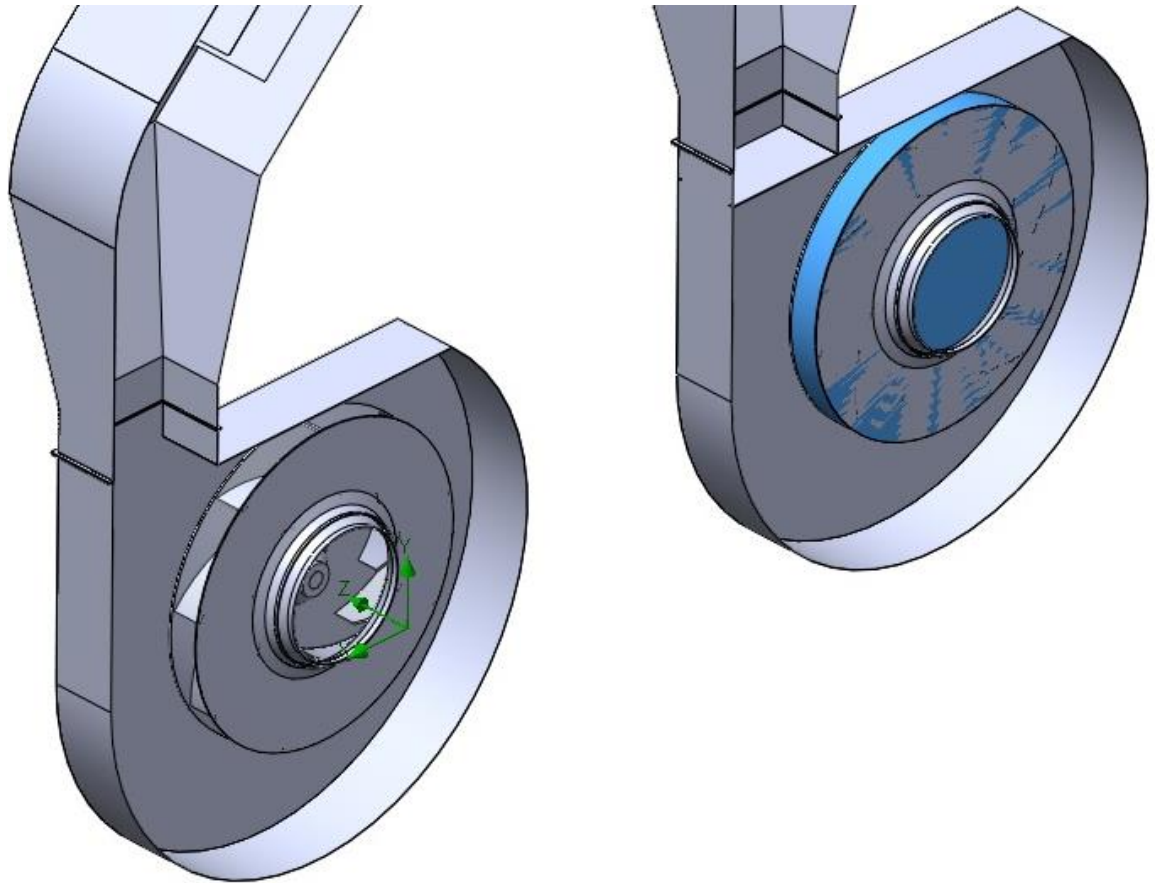
Ulkoisella virtaustyyppillä voidaan mallintaa esimerkiksi virtausta lentokoneen siipeen. Tällöin fluidi virtaa mallinnetun geometrian ulkopuolella. Sisäisellä virtaustyyppillä voidaan mallintaa virtausta mallinnetun geometrian sisäisissä tyhjiä tilavuuksissa. Esimerkkinä sisäisestä virtauksesta voidaan käyttää putkistoa. Putkistossa fluidi kulkee sen geometrian sisäisessä tyhjässä tilassa. Työssä käytetyn mallinnuksen tyyppi tuli siis määrittää sisäiseksi virtausmallinnukseksi.

Virtaukselle tuli syöttää sisään- ja ulostulon reunaehdot, joiden perusteella ohjelma osasi laskea virtauksen kehittymistä. Reunaehdot määritettiin imuputken päähän sekä kanaviston loppuun eli arinakaappiin. Kanaviston imuputken alkuun asetettiin rajaehdoiksi ilmakehän paine 101325 Pa sekä kattilarakennuksen katto- tasolta mitattu keskilämpötila 308 K. Arinakaappiin rajaehdoiksi asetettiin valvom- on käyttöliittymästä lasketut absoluuttiset arvot 110925 Pa ja 476 K. (Kuva 10.)



Kuva 10. Arinan ja arinakaapin arvoja valvomon käyttöliittymässä.

Malliin tulevan ilmvirtauksen tuli syntyä puhaltimien siipipyörien pyörimisliik- keistä. Rotating region -toiminnolla malliin pystyttiin määrittämään geometrialle pyörimisliike. Näin virtauksesta saatiin luonnollinen ja aitoa tilannetta vastaava, koska ilmvirtaus kehittyi nyt kanaviston päissä vallitsevien paine-erojen sekä sii- pipyörien liikkeen yhteisvaikutuksesta. Rotating regionin määrittämiseksi tuli siipi- pyörän ympärille tehdä sen peittävä sylinterigeometria. (Kuva 11.) Tämän jälkeen rotating regionin kierrosnopeus ja pyörimissuuntaparametrit määritettiin kyseiselle sylinterigeometrialle. Kierrosnopeus asetettiin puhaltimien varsinaisten kierrosno- peuksien mukaan, eli noin 1480 rpm.



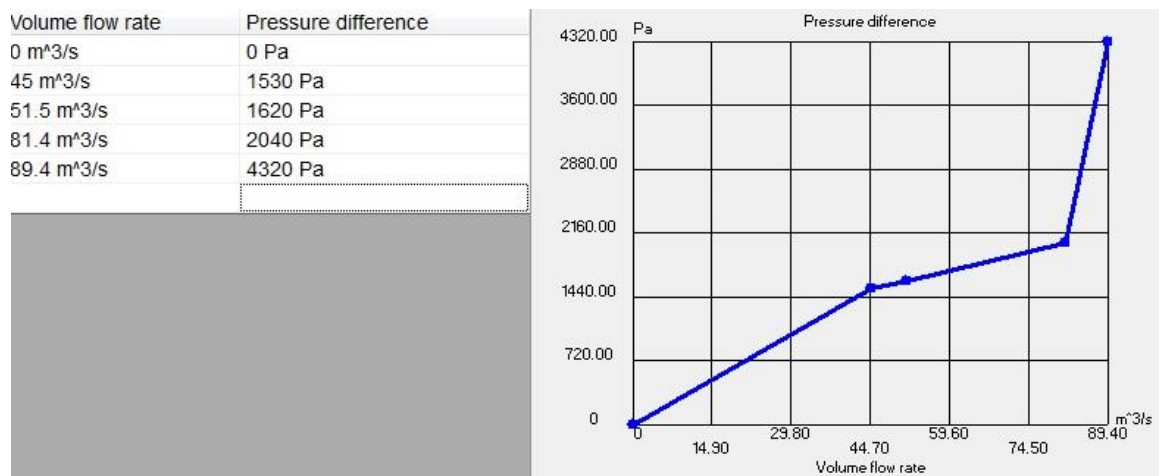
Kuva 11. Rotating region toimintoa varten asetettu sylinterigeometria näkyvissä kuvan oikeanpuoleisen puhaltimen siipipyörässä sinisenä.

Mallissa tuli ottaa huomioon myös virtauksia vastustavat komponentit, kuten kanavistossa esiintyvä ilmaluvo sekä höyryluvo. Tämä onnistui käyttämällä ohjelman porous medium -toimintoa. Toiminnolla syötettiin ilmavirtaa vastustavien komponenttien tietoja Kainuun Voimalta kerättyjen tietojen perusteella. Alustavia tietoja painehäviöistä kerättiin Kainuun Voiman valvomon käyttöliittymästä ja kiertopeti-kattilan dokumenteista (Liite 1).

Porous medium -toiminnon määrittämiseen oli todella paljon eri parametreja ja määrittystapoja. Tässä työssä käydään läpi vain toteutuksessa käytetty määrittäytapa. Kyseisten toimintojen määrittäminen aloitettiin lisäämällä malliin vastustavia komponentteja kuvaavia geometrioita, johon porous medium voitiin asettaa. Geometria asetettiin höyryluvun sekä ilmaluvun paikoille.

Parametreihin tuli syöttää läpäisevyyttä kuvaava tyyppi (permeability type). Läpäisevyyttä kuvaavaksi tyypiksi valittiin molempaan luvon unidirektionaalinen eli yksisuuntainen tyyppi. Tämä siksi että luvojen kennostot tasaavat ilmavirran yksisuuntaiseksi. Parametreihin tuli myös syöttää porous mediumin paksuus sekä pinta-ala. Nämä määritettiin kanaviston mukaisesti.

Tämän jälkeen toimintoon tuli määrittää virtausvastuksen määrittystapa. Määrittäviksi valittiin painehäviön ja tilavuusvirran suhde koska nämä kävivät ilmi Kainuun Voiman dokumenteista. Ohjelmassa pystyi tämän jälkeen syöttämään painehäviön sekä tilavuusvirran taulukkoarvoina, jolloin ohjelma teki kyseisistä arvoista lineaarisen kuvaajan, jota se noudattaa ilmavirran läpäistessä geometrian. (Kuva 12.)



Kuva 12. Painehäviön ja tilavuusvirran kuvaaja.

Kun porous medium -toiminnot oli asetettu, testattiin niiden käyttäytymistä simuloimalla ohjelmaa. Simuloinnista saadusta tilavuusvirrasta laskettiin normitettu tilavuusvirta ja sitä verrattiin Kainuun Voiman käyttöliittymässä näkyviin arvoihin.

Dokumenteissa ilmoitetut painehäviöt olivat valmistajan ilmoittamat, joten voitiin olettaa, että ne kuvasivat kennojen painehäviöitä uusina ja puhtaina. Ilmaluvon kennostoihin kertyy kuitenkin käytön yhteydessä savukaasujen mukana kulkeutuvaa tuhkaa. Ajan kanssa tämä aiheuttaa ilmavirran painehäviön kasvua kennoston yli.

Taulukoituja painehäviöiden arvoja nostettiin alkuperäisessä suhteessa ja näin iteroitiin, kunnes mallista saatu arinakaapin normitettu tilavuusvirta vastasi liki oikeaa tilannetta. (Taulukot 1 ja 2)

Taulukko 1. Simulaation arinakaapista saatuja arvoja.

Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m <sup>2</sup> ]
Pressure [Pa]	110902,63	110916,60	110906,67	110907,64	40,76
Velocity [m/s]	0,05	7,06	2,19	4,66	40,76
Temperature (Fluid) [K]	293,37	475,99	385,99	315,32	40,76

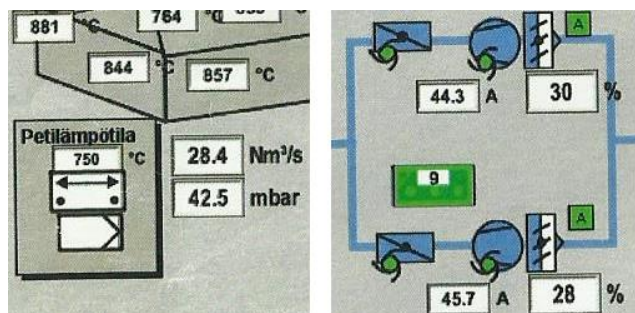
Taulukko 2. Simulaation arinakaapista saatuja integraali arvoja.

Integral Parameter	Value	X	Y	Z	Surface Area [m <sup>2</sup> ]
Mass Flow Rate [kg/s]	52,44				40,76
Volume Flow Rate [m <sup>3</sup> /s]	40,59				40,76

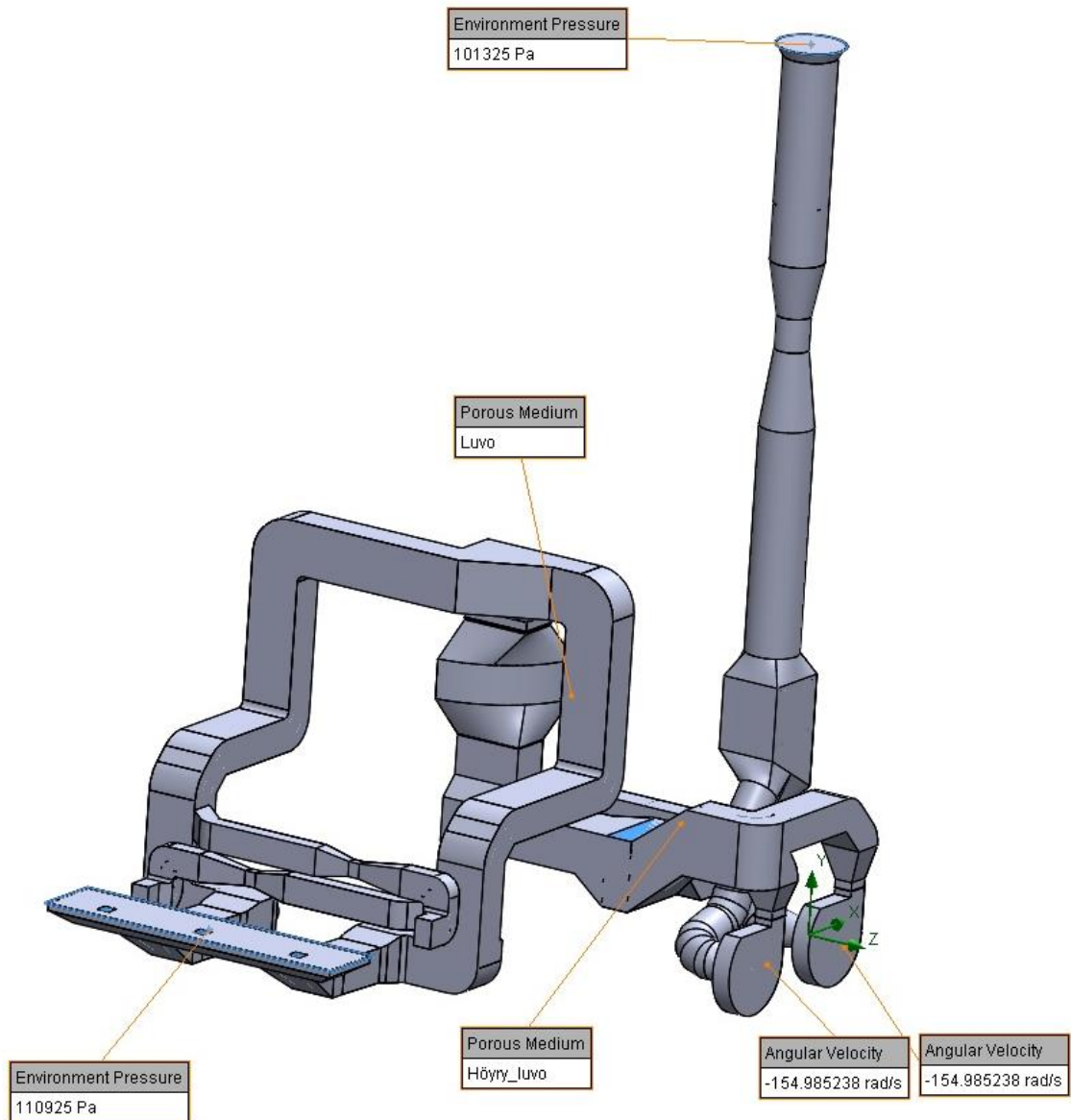
Taulukkojen 1 ja 2 tilanteessa puhaltimien siipisäätimet oli asetettu 25,5 % ja 24,9 % auki molempien puhaltimien ollessa päällä. Taulukon arvoista laskemalla normitettu tilavuusvirta määräytyi kaavan 4 mukaisesti.

$$Q_N = \frac{P \cdot Q \cdot T_0}{P_0 \cdot T} = \frac{110906,67 \text{ Pa} \cdot 40,59 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 273 \text{ K}}{101325 \text{ Pa} \cdot 385,99 \text{ K}} \approx 31,42 \text{ Nm}^3/\text{s} \quad (4)$$

Valvomon käyttöliittymästä saatu arinakaapin normitettu tilavuusvirta oli 28,4 Nm<sup>3</sup>/s. Kyseisessä käyttöliittymän tilanteessa puhaltimia ajettiin melkein vastaavilla siipisäätimen asennoilla (30 % ja 28 %). (Kuva 13.)



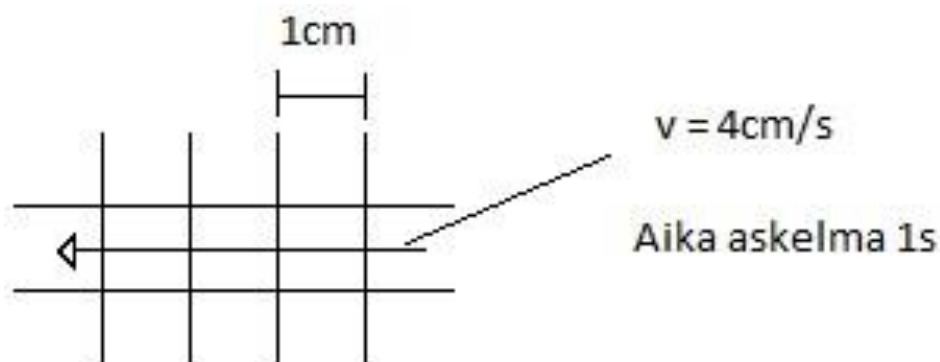
Kuva 13. Simulointia melkein vastaavat arvot valvomon käyttöliittymässä.



Kuva 14. Malliin asetetut toiminnot.

Koska havaittu vika primääri-ilmakanavistossa oli havaittavissa värinänä ja iskuina, oli virtausmallinnuksesta järkevä tehdä aikariippuvainen (Time dependent). Aikariippuvaisella mallinnuksella tarkoitetaan CFD-mallinnuksessa virtausmallia, jota voidaan seurata ajan suhteen. Malli voidaan asettaa näyttämään haluttua virtausta esimerkiksi viiden sekunnin ajan, jolloin voidaan seurata virtauksen kehittymistä ja elämistä dynaamisesti. Aikariippuvaisessa mallissa tulee usein vastaan todella pitkät tietokoneen laskenta-ajat. Laskenta aikoihin voidaan pitkälti vaikuttaa tietokoneen suorituskyvyllä, mallin verkkojen tarkkuudella ja mallin laskentamääritteillä.

Mallin laskentamääritteillä voidaan säätää virtausmallin fyysinen ajan kesto sekunteina sekä laskennan aika askelma (Time step). Aika askelmalla tarkoitetaan aikariippuvaisessa mallinnuksessa aikaa, jonka välein tietokone laskee tuloksia. Esimerkiksi jos mallin kokonaisaika on 10 s ja mallin aika askelmaksi on määritetty 1 s, laskee tietokone tällöin fluidin aseman verkossa kymmenen kertaa mallin aikana. Verkon soluleveyden ollessa 1 cm ja fluidin virtausnopeus 4 cm/s siirtyy fluidi kolmen verkkosolun yli yhdellä aika-askelmalla. (Kuva 15.) Isommalla skaalalla tämä aiheuttaa epätarkkuuksia mallissa, eikä verkkolle asetettu tarkkuus palvele tarkoitustaan.



Kuva 15. Aika-askelma ja verkon tarkkuus.

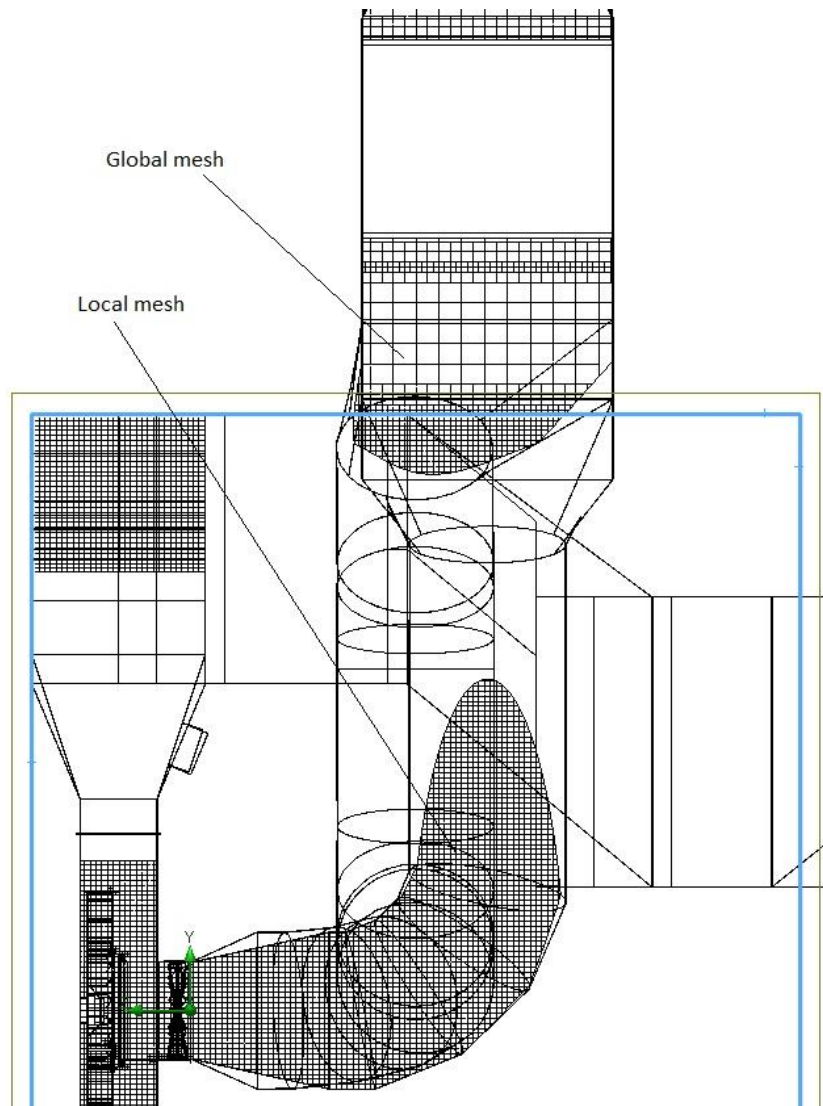
Aikariippuvaisessa simuloinnissa oli erityisen tärkeää määrittää verkon (Mesh) tarkkuus sekä aika askelma oikeassa suhteessa. Liian suurella aika-askelmalla virtausmallin tulokset saattoivat olla kaottiset ja epärealistiset. Oletuksena ohjelma käyttää automaattista aika askelman määrittystä, jolloin laskenta-aika voi venyä viikkoja kestäväksi.

Aika askelman määrittämisessä tuli käyttää apuna Courantin lukua. Courantin luku on laaduton, joka määrittyy kaavan 5 mukaisesti.

$$C = v * \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (5)$$

Missä C on Courantin luku, v on fluidin virtausnopeus,  $\Delta t$  on aika-askelma,  $\Delta x$  on verkon pienimmän solun leveys. Courantin luku tulisi olla alle 1, mikä tarkoittaa, että virtausmallinnuksessa fluidi kulkisi verkon solusta viereiseen soluun eikä ”hypi” soluja yli. Näin mallinnuksesta tulee tarkempi ja verkon tarkkuudesta saadaan enemmän hyötyä. [4.]

Simuloinnissa käytetty verkko tehtiin tarkemmaksi puhaltimien ympäriltä paikallisella verkolla (local mesh). Tällä pyrittiin saamaan tarkempi virtausmalli paikasta, jota halutaan tutkia ja lyhentämään tietokoneen laskenta aikaa. Tietokoneen laskenta aika lyheni, koska tietokoneen ei tarvinnut laskea muita kohtia näin tarkasti. Kuvassa näkyvä sininen viiva korostaa paikalliselle verkolle määritettyä aluetta, joka on asetettu mallinnusvaiheessa tehtyyn geometriaan. (Kuva 16.)



Kuva 16. Paikallinen ja globaali verkko.

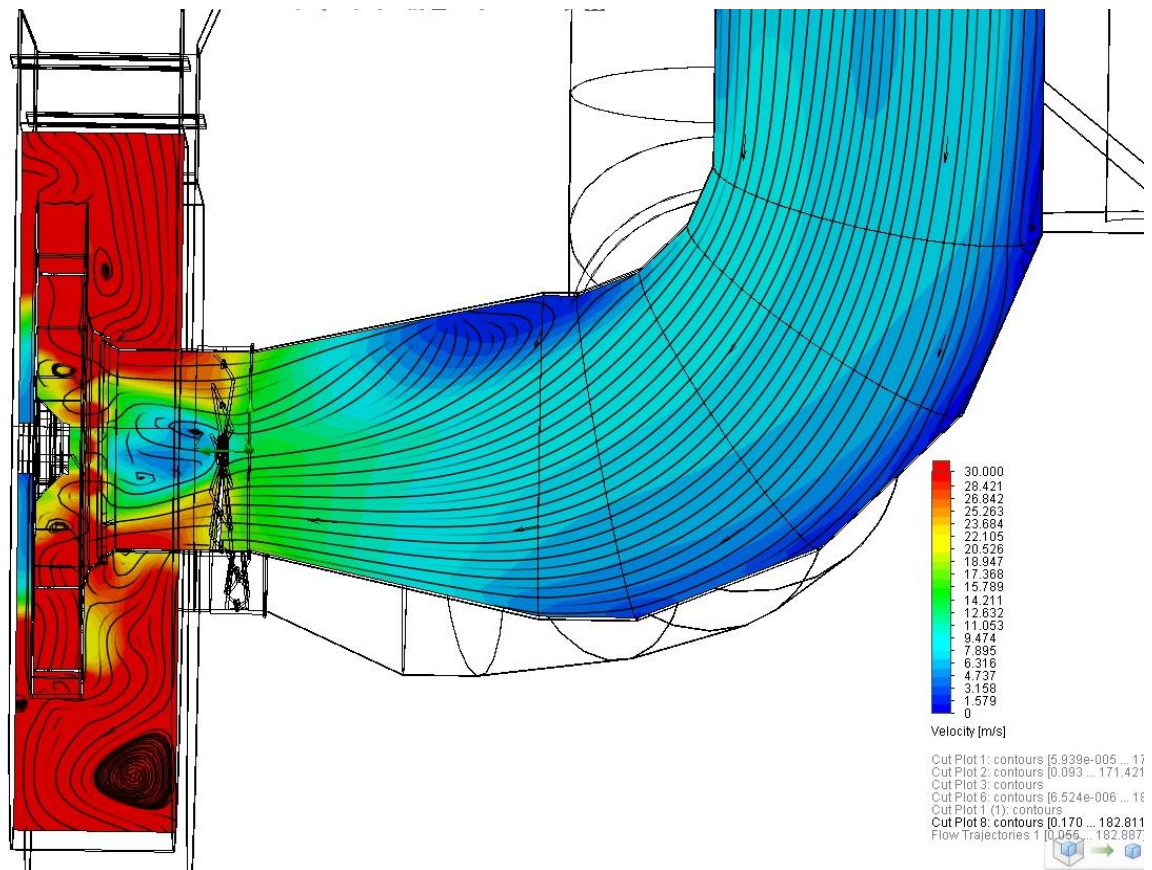
Simulointituloksien laskemiseen tietokoneella meni aikaa noin 20 tuntia tilannetta kohden. Ottaen huomioon simuloinnissa käytetyt eri variaatiot sekä tilanteet, tietokoneen yhteinen laskenta aika venyi useisiin satoihin tunteihin. Laskennan tuloksista kertyi dataa muutamia teratavuja, jonka vuoksi kaikkia lopputuloksia ei voinut edes fyysisesti säilyttää.



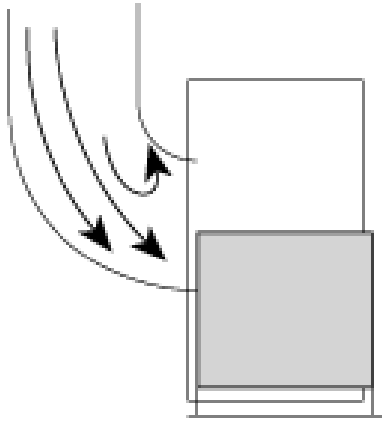
### 4.3 Analysointi ja muutoskokeilut

Useiden simulointitulosten jälkeen alkoi hahmottua kuvaa siitä, mitä kanavistossa tapahtuu. Analyysissä tuli seuraavanlaisia huomioita.

Imupuolen kanavat kääntyvät juuri ennen puhaltimia jyrkästi, mikä tekee virtauksen jakautumisen puhaltimelle epätasaiseksi. (Kuvat 17 ja 18.) Epätasainen ilmavirran jakautuminen siipipyörälle voi aiheuttaa nopeuseroja ja siten myös paineeroja siipipyörän eri puolille. Tämä voi mahdollistaa aksiaalisia iskuja puhaltimeen. Mahdollinen ratkaisu on joko pidentää imuputken suoraa osaa tai vaihtoehtoisesti yrittää jakaa puhaltimeen menevä virtaus tasaisemmin esimerkiksi virran ohjauslevyillä.



Kuva 17. Ilman virtaviivat ja nopeudet.



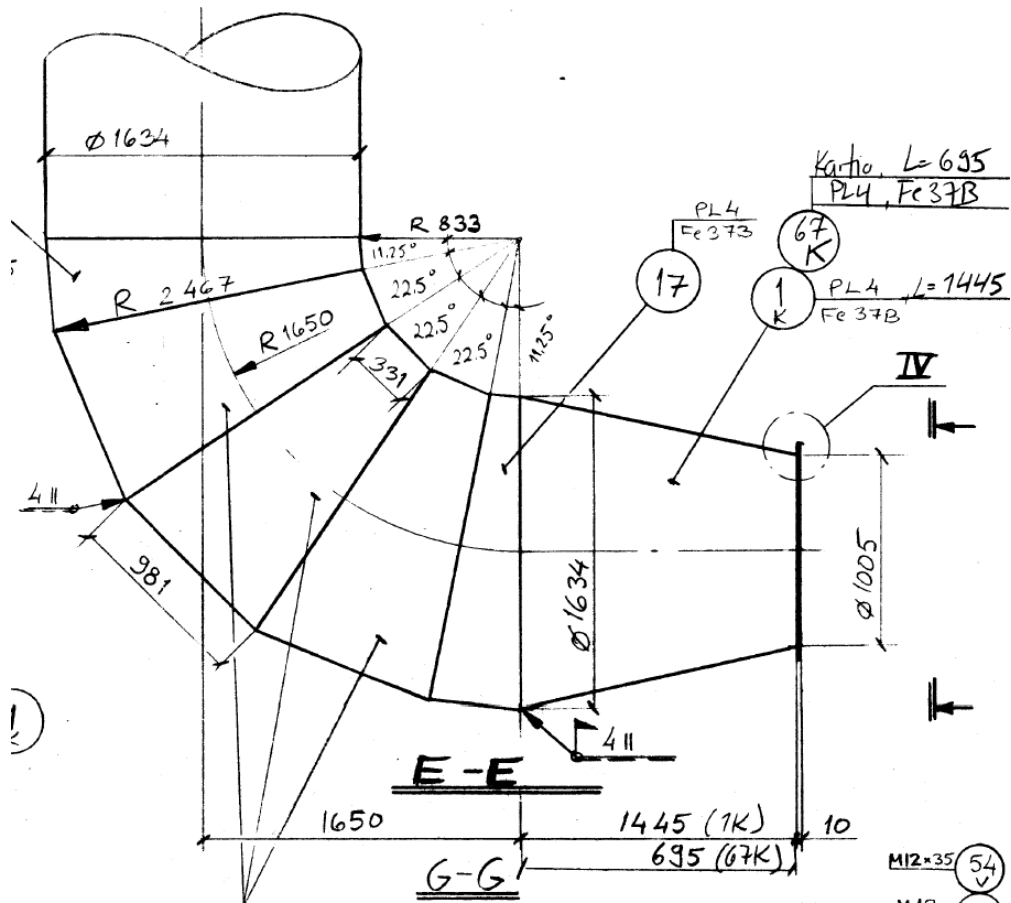
**Fig. 10**  
**Poor**  
 Figure 10 illustrates a poor installation with an elbow directly at the fan inlet.

Kuva 18. Greenheckin sovellusohjeiden mukaan mutka ennen imupuolta on huono vaihtoehto. [6.]

Toinen imupuolen toimintaan vaikuttava tekijä on puhaltimen säätösiivekkeen napa, joka tekee virtauskenttään häiriöitä. Tämä voi olla yksi syy aksiaalisille iskulle epätasaisen ilmavirran jakautumisen vuoksi. Mahdollinen ratkaisu tähän voisi olla siipisäädinmallin vaihtaminen navattomaan versioon. Säätösiivekkeen muutosta tulee arvioida imupuolen virtauksen tasauselementtien simuloinnin jälkeen. Mikäli virtauselementit rauhoittavat virtaa tarpeeksi, ei säätösiivekkeen muutoksille ole tarvetta.

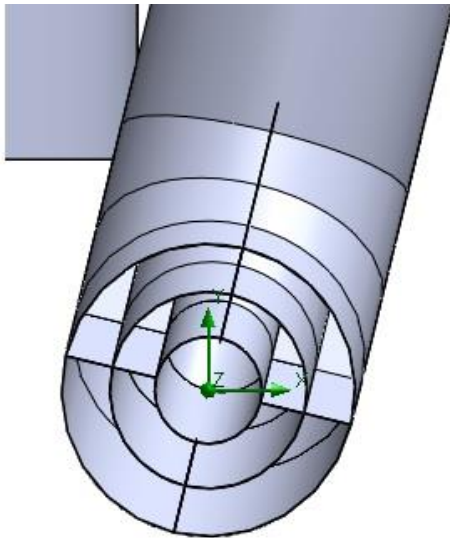
Puhaltimien kanavistoihin on olemassa mitoitusohjeita, joiden mukaan voidaan määrittää imu- ja painepuolien suorien osien pituudet. Suorien osien tarkoitus on tasoittaa puhaltimeen menevää ilmavirtaa. Mitoitusohjeiden mukaisesti imupuolella täytyisi olla ideaalitulanteessa suoraa osaa neljä kertaa kanavan halkaisijan verran ja vähintään edes kaksi [5.].

Näin mitoitettuna puhaltimessa tulisi ideaalitulanteen mukaisesti olla pituutta noin neljä metriä, koska puhaltimen imupuolen halkaisija on 1005 mm. Puhaltimien nykyisessä versiossa suoran osuus on ykköspuhaltimella 695 mm ja kakkospuhaltimella 1445 mm. Tämäkin suora osa on imukartiota, joka nopeuttaa ilman virtausta. (Kuva 19.)



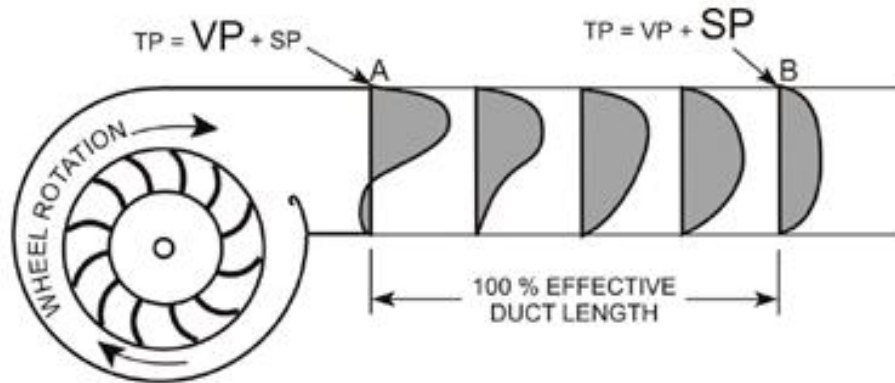
Kuva 19. Imukanava puhaltimen kurkulla.

Imupuolen pidennys ei kuitenkaan ole käytännössä mahdollista tilan puutteen vuoksi. Tästä syystä malliin asetettiin kokeiltavaksi sisäkkäisistä putkista koostuva virtausta tasaava elementti puhallinta edeltävään mutkaan. (Kuva 20.)



Kuva 20. Virtausta tasaava elementti.

Painepuolella heti puhaltimen jälkeen oleva suora osa on merkityksellinen hyötysuhteen, melun ja toimivuuden kannalta. Voittaakseen virtausta vastustavia voimia, tulee virtauksen staattinen paine olla mahdollisimman korkea. Puhaltimen kurkun kohdalla ilmavirtauksella on suuri dynaaminen paine ja pieni staattinen paine. (Kuva 21.)



Kuva 21. 100 % effective duct length.

Tämän vuoksi painepuolella tulee olla suoraa osaa, että ilmavirtaus ehtii tasoittua ja saavuttaa mahdollisimman suuren staattisen paineen. Liian lyhyellä suoralla osalla ilmavirtaus saa aikaan suuria pyönteitä jotka aiheuttavat myös melua. Mitoitusohjeiden mukaan painepuolen suoran osan pituus voidaan määrittää seuraavalla tavalla. [5.]

- Ulospuhallusnopeuden ollessa alle 12,7 m/s: Pituus = 2.5 x Kanavan halkaisija
- Ulospuhallusnopeuden ollessa yli 12,7 m/s: Lisätään jokaista 12,7 m/s:ta yli menevää 5,08 m/s kohti yksi kanavan halkaisija

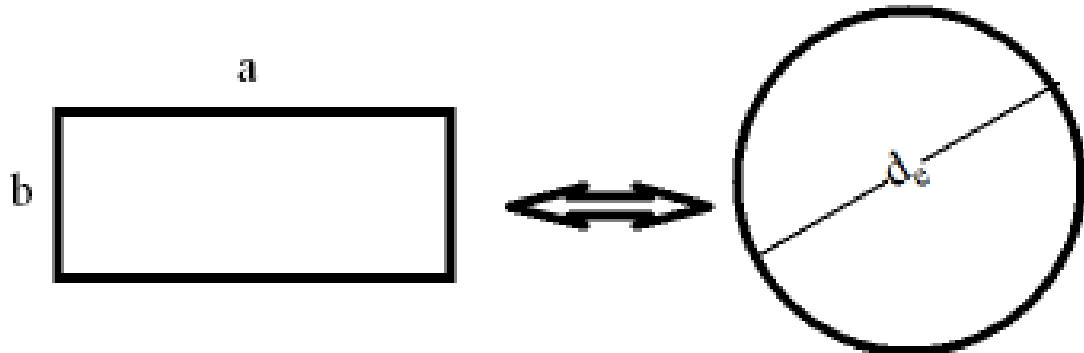
Puhaltimen ulospuhallusnopeus maksimivirtausnopeudesta ja puhaltimen suuaukosta laskettuna määräytyy kaavan 6 mukaisesti.

$$Q/A = v \quad (6)$$

$$\frac{48m^3}{1m * 0,8m} = 60m/s$$

Jolloin suoran osan pituuden määrittämiseksi käytetään alempaa määrittystapaa.

Koska puhaltimien painepuolen kanava on profiililtaan suorakaiteen muotoinen, tulee kaavoissa käyttää ekvivalenttia kanavan halkaisijaa. (Kuva 22.) Ekvivalentti kanavan halkaisija voidaan laskea kaavan 7 mukaisesti. [7.]



Kuva 22. Ekvivalentti halkaisija. [7.]

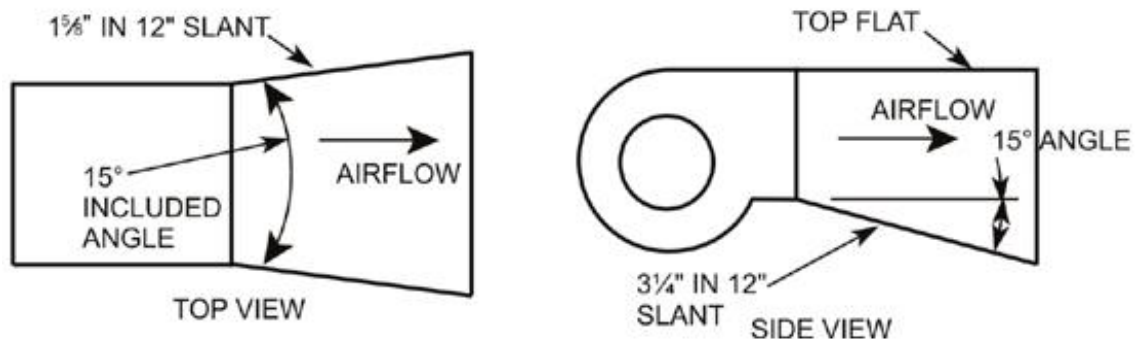
$$D_e = \frac{1,30(ab)^{0,625}}{(a+b)^{0,25}} \quad (7)$$

$$D_e = \frac{1,30(1000\text{mm} * 800\text{mm})^{0,625}}{(1000\text{mm} + 800\text{mm})^{0,25}} \approx 976\text{mm}$$

Näin ollen suoran osan pituuden tulisi olla

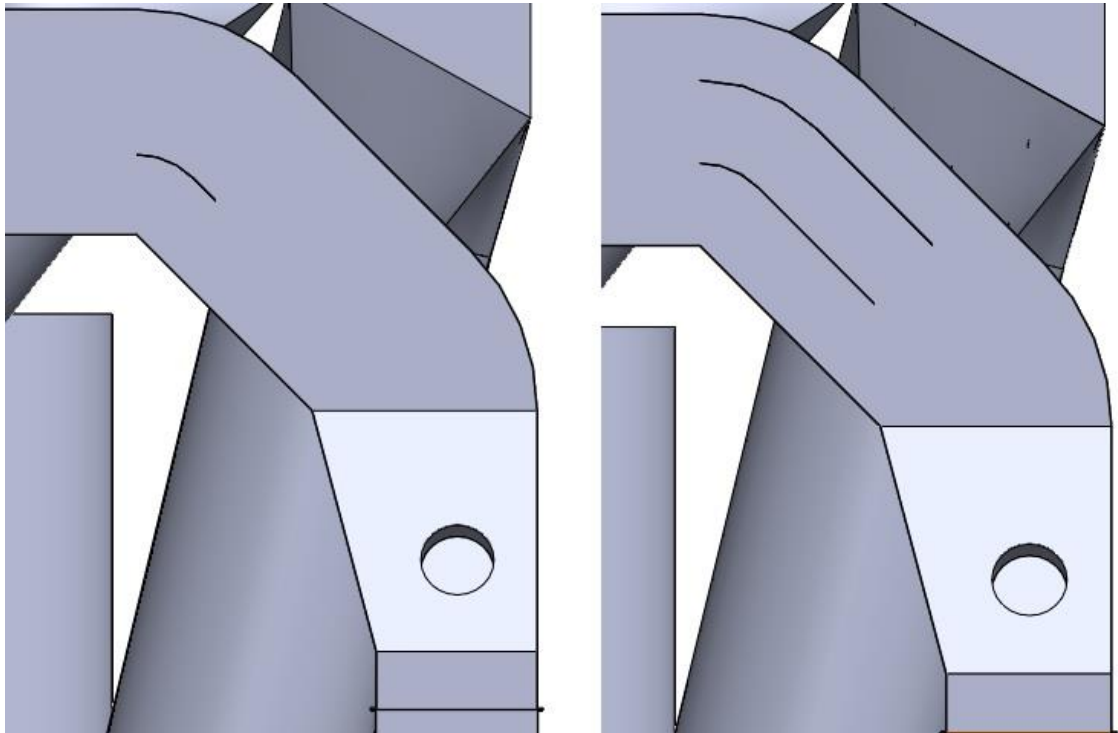
$$L = \frac{(60 - 12,7)\text{m/s}}{5,08\text{m/s}} * 0,976\text{m} + 2,5 * 0,976\text{m} \approx 11,5\text{m}$$

Todellisuudessa painepuolen suoran osan pituus on jätetty todella lyhyeksi, mutta staattisen paineen nostamista on pyritty tilan puutteen vuoksi kompensoimaan evaseella. (Kuva 23 ja 24.) Evasee on eräänlainen diffuuseri, jota käytetään radiiaalipuhaltimien painelähdössä. [5.]



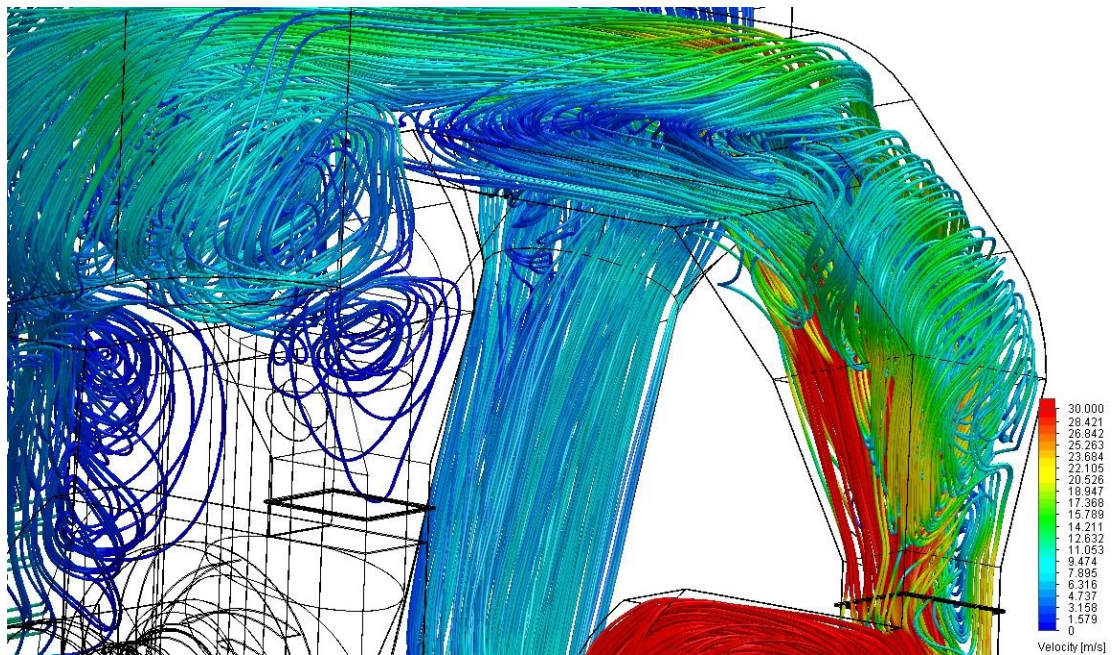
Kuva 23. Evase on ranskaa ja tarkoittaa suomeksi levenevää. [5.]





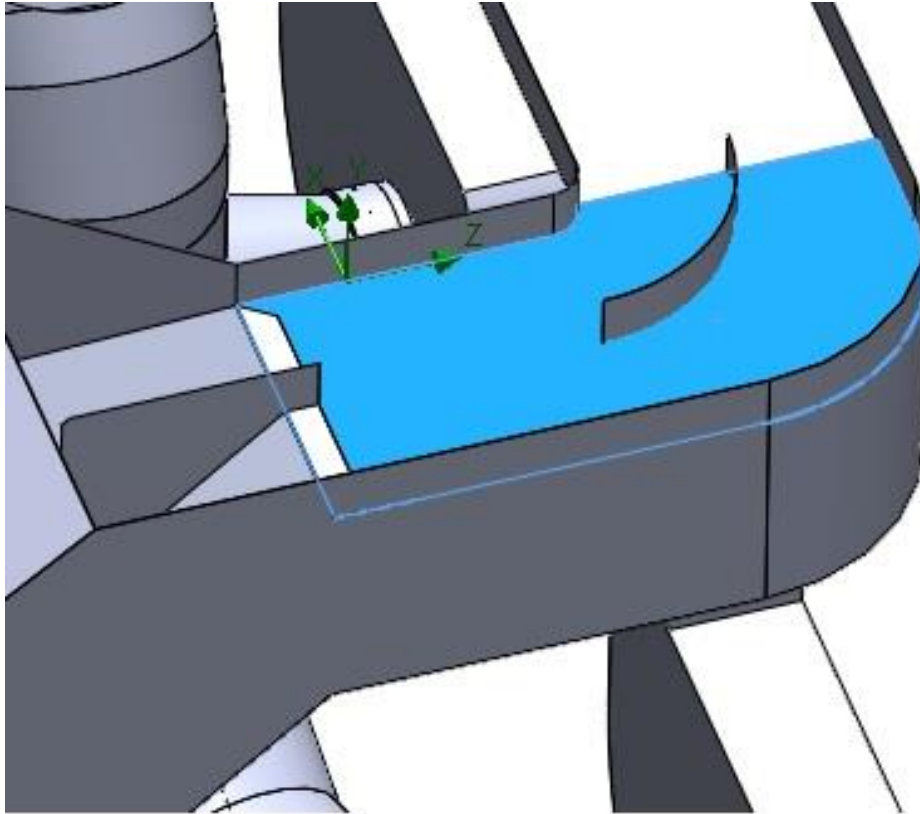
Kuva 26. Puhaltimen 2 painepuolen ohjauslevyjen muutos.

Puhaltimien painepuolella kanavien yhtymäkohdassa syntyy pyörre ilmavirtaan puhaltimen 2 ollessa päällä. (Kuva 27.) Toisaalta tässä kohtaa ilmavirtaan tulee melkein väistämättä pyörteitä, johtuen suuresta turbulenssista sekä kehittymättömästä staattisesta paineesta.



Kuva 27. Pyörre kanavien yhtymäkohdassa

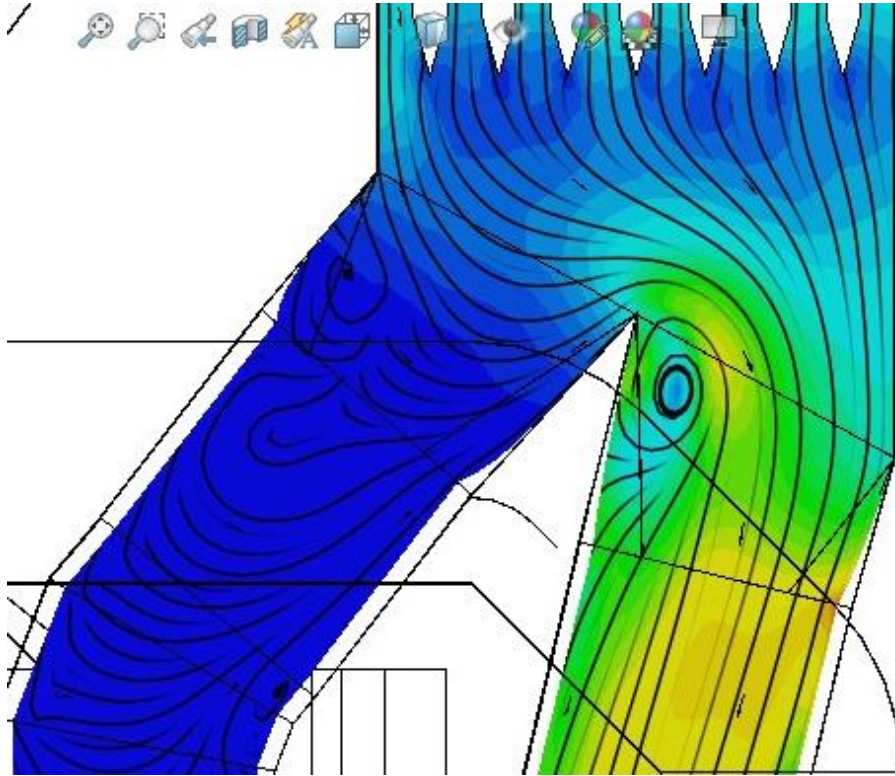
Malliin asetettiin kokeiltavaksi kanavia toisistaan erottava levy, jolla pyrittiin rauhoittamaan pyörteen syntymistä puhallin 1:n evaseehen. (Kuva 28.) Puhaltimen 1 ilmavirta nousee myös suoraan ylöspäin, ikään kuin vasten puhaltimen 2 virtaa ja voi näin ollen huonontaa puhaltimen 2 virtausta.



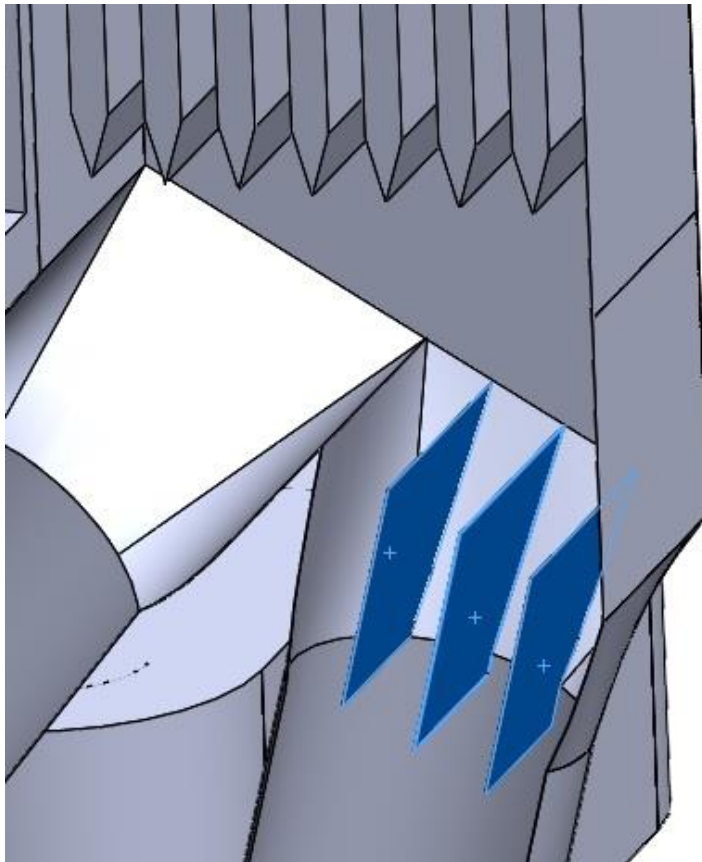
Kuva 28. Erotuslevy.

Imupuolen äänenvaimentimen jälkeiseen kanaviston haarautumiskohtaan syntyy pyörre puhaltimen 2 ollessa päällä. Ilmavirta imeytyy äänenvaimennuselementteistä tasaisesti läpi ja joutuu kaartamaan puhaltimen 2 kanavaan sen suunnasta johtuen. (Kuva 29.) Vastaavaa ilmiötä ei tapahtunut puhaltimen 1 ollessa päällä, koska sen kanava on suunnattu paremmin äänenvaimennuselementtien suuntaisesti. Imupuolen haaraumakohtaan asetettiin kokeiltavaksi virtausta ohjaavia levyjä. (Kuva 30.)



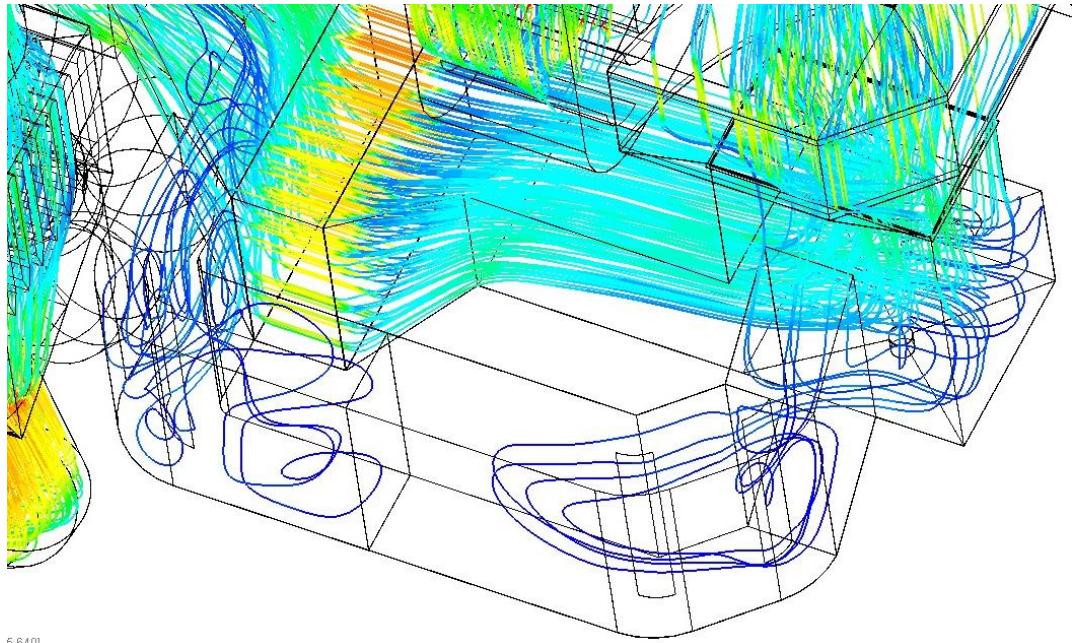


Kuva 29. Imupuolen haarautuma.

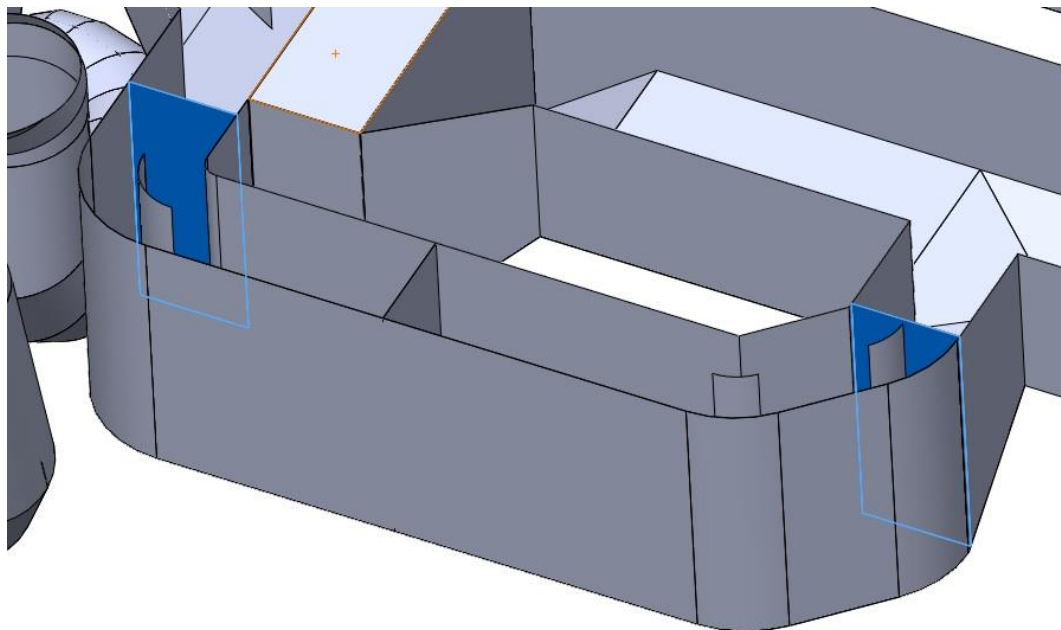


Kuva 30. Imupuolen haaraumakohdan ohjauslevyt.

Höyryluvon ohituskanavaan syntyy turhia virtauksia. (Kuva 31.) Ohituskanavassa on sulkku, jonka molemmin puolin virtaukset pääsevät syntymään. Nämä huonontavat kanaviston hyötysuhdetta ja aiheuttavat melua kanavistossa. Höyryluvon läpi menevä ilmavirta on mallin mukaan hitaampaa ohituskanavan puoleisella sivulla. Tämä voi vaikuttaa höyryluvon hyötysuhteeseen. Malliin kokeiltavaksi asetettiin sulkulevyt ohituskanavan alkuun ja loppuun nykyisen sulkulevyn lisäksi. (Kuva 32.)



Kuva 31. Turhia virtauksia höyryluvon ohituskanavassa.



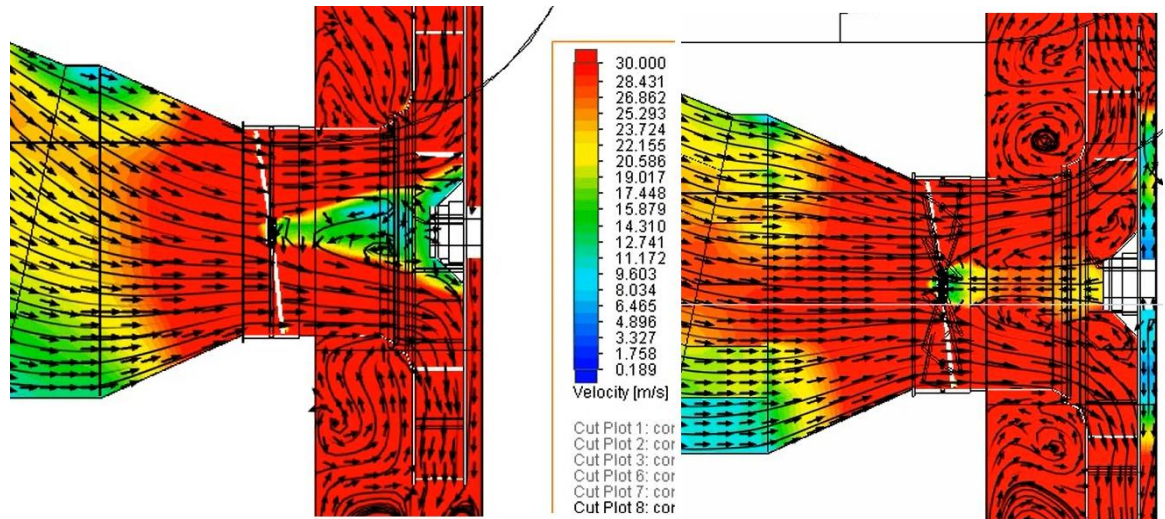
Kuva 32. Höyryluvon ohituskanavaan asetetut sulkulevyt.

Malliin tehtiin paljon muitakin kokeiluja, mutta kaikkea ei kannattanut ottaa työhön raportoitavaksi. Huomiotta jätetyistä kokeiluista ja niiden simulointituloksista suurin osa oli alustavia mallinnuksia työssä esitetyistä kohdista. Lopulliset mallit siis kehittyivät näiden tulosten perusteella.

Simulointitulosten runsaasta tallennuskapasiteetin tarpeesta johtuen kaikkia testattuja tilanteita sekä niiden tuloksia ei ollut tämänkään takia mielekästä säilyttää. Tallennuskapasiteetti loppui monta kertaa kesken ja tätä varten hankittiin erillinen ulkoinen tallennusmedia. Vaikka ulkoisessa tallennusmediassakin kapasiteettia oli taratavun verran, jouduttiin tuloksia poistamaan uudempia tuloksia varten.

#### 4.4 Muutoksien vaikutukset

Tehdyistä muutoksista merkittävimpiä ja varteenotettavia tuloksia antoi puhaltimen imupuolelle asetettu virtausta tasaava elementti. Virtauskentät tasoittuivat puhaltimelle mennessä ja aikaisimmissa simuloinneissa havaittu siipisäätimen jälkeinen nopeusvaihtelu hävisi lähes kokonaan. (Kuva 33.)

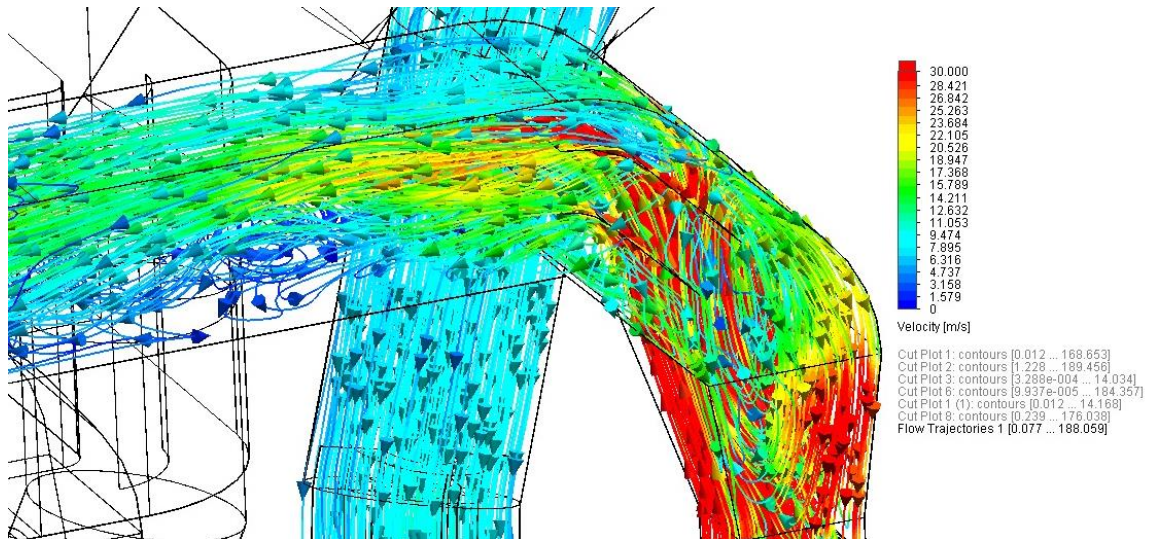


Kuva 33. Imupuolen virtausvektorit ennen (kuvassa vasemmalla) ja jälkeen (oikealla).

Liikkumattomissa kuvissa vaikutuksen näkee parhaiten imupuolella virtausvektorien suoristumisena. Aikaisemmillä simuloinneilla vektorit tulivat viistosta ja aiheuttivat aikariippuvaisessa mallissa näkyvän epävakaan pyörteen siipisäätimen jälkeen.

Puhaltimen 2 painepuolen ohjauslevyjen osalta kokeilu antoi jopa huonompia tuloksia kuin alkuperäisessä mallissa. Muutos aiheutti puhaltimen jälkeiseen tilaan yhä suurempia pyörteitä. (Kuva 34.)

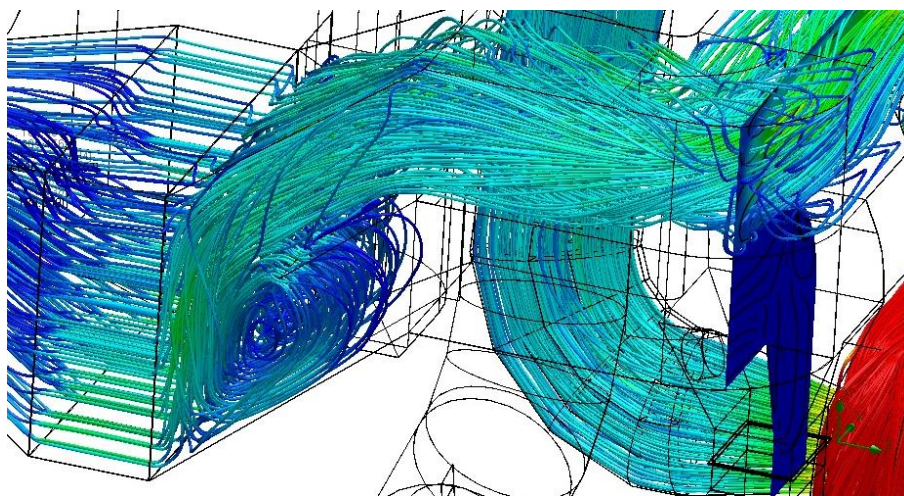
Virtausradat muodostavat ohjauslevyjä ennen pyörteitä. Tästä syystä myös virtauksen nopeus hidastui. Kyseisien ohjauslevyjen muutostyöhön ei tämän perusteella kannata ryhtyä.



Kuva 34. Puhaltimen painepuolen muutoksien jälkeinen virtaus.

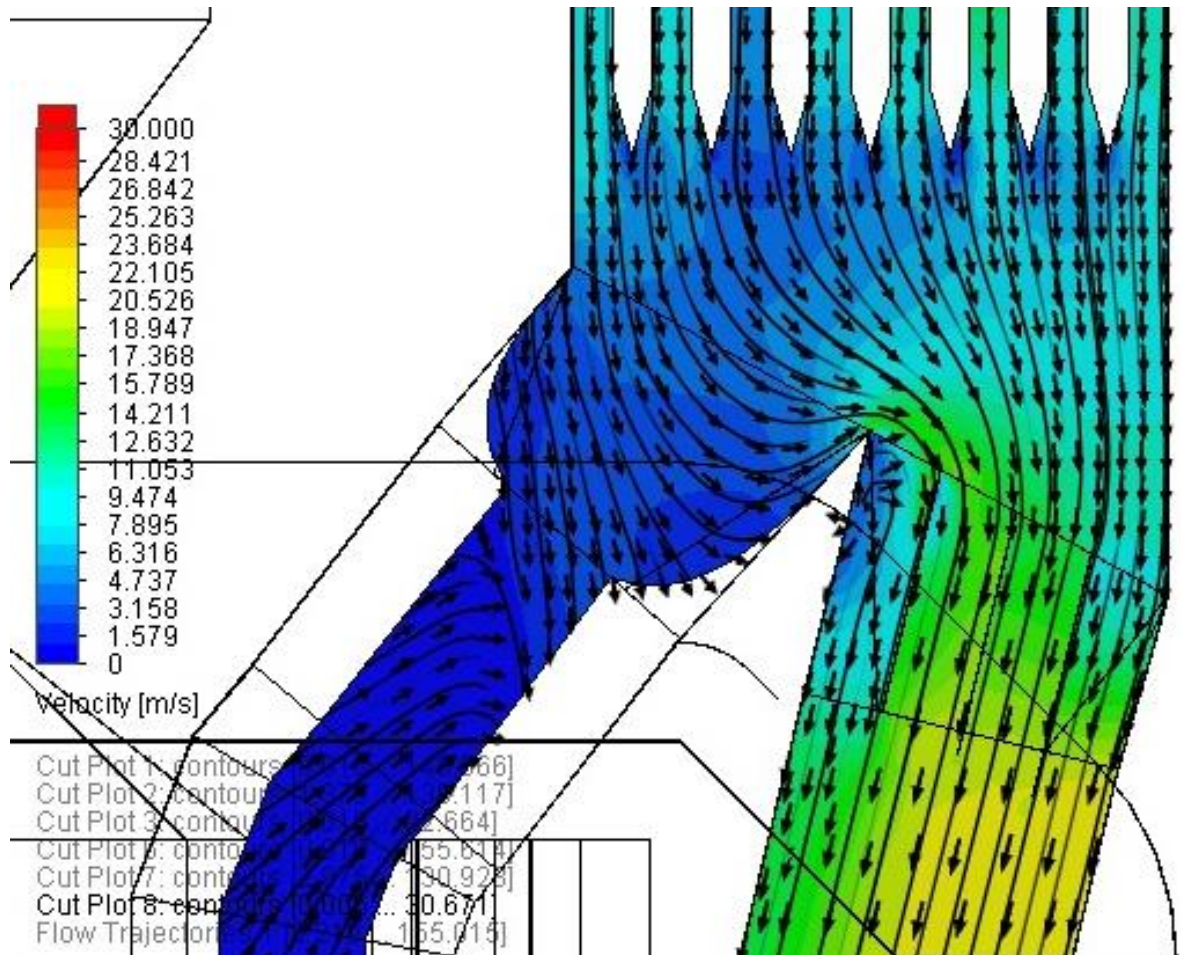
Kanavistojen yhtymäkohtaan asetettu puhaltimien virtauksia jakava erotuslevy ei tuottanut toivottuja tuloksia. Erotuslevyn tarkoitus oli pitää puhaltimien virtaukset erillään siihen asti, että virtaukset ovat saman suuntaisia. Molempien puhaltimien ollessa päällä erotuslevy ajoikin asiansa, mutta puhaltimien yksittäisajo olisi huonontunut.

Puhaltimien yksittäisajolla syntyi suuri pyörre juuri ennen höyryluvoa. Ilmavirta pyrki osaksi purkautumaan kiinni olevan puhaltimen kanavaan. (Kuva 35.) Tästä syystä höyryluvon ja siitä eteenpäin menevä ilmavirtaus hidastui radikaalisti suhteessa alkuperäiseen malliin. Näiden havaintojen pohjalta päätettiin, ettei erotuslevyjä asenneta.



Kuva 35. Puhaltimen 2 yksittäisajo virtauksen erotuslevyllä.

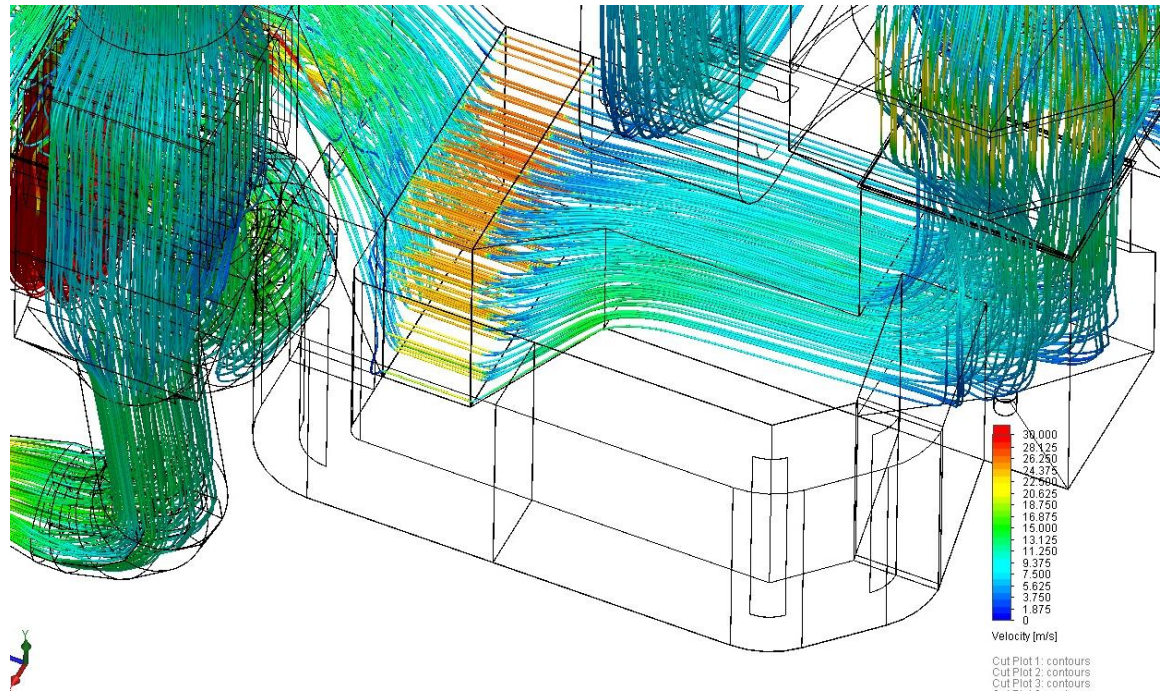
Imupuolen haarautumaan asetetut virtausta ohjaavat levyt näyttivät rauhoittavan pyörteen syntymistä puhaltimen 2 kanavaan. Kanavassa esiintyi edelleen pyörre, mutta se oli kuitenkin paljon rauhallisempi kuin alkuperäisessä mallissa. (Kuva 36.)



Kuva 36. Imupuolen haarautuman virtaus.

Haarautumaan kokeillut ohjauslevyt voisivat olla varteenotettava muutos ilmavirtauksien hyötysuhdetta parantamaan. Helpon toteutuksen vuoksi muutos voitaisiin toteuttaa esimerkiksi huoltoseisokin yhteydessä muiden korjaustöiden ohessa.

Höyryluvon ohitukseen asetetut sulut ajoivat tehtävänsä ja turhat virtaukset poistuivat. Myös höyryluvon läpi menevän ilmavirran virtausnopeus tasoittui molemmilta puolilta yhtä nopeiksi. (Kuva 37.)



Kuva 37. Höyryluvon ilmavirta ohituskanavan sulkujen muutoksen jälkeen.

Höyryluvon ohituskanavan sulkujen siirrolla saataisiin mahdollisesti puhaltimien hyötysuhdetta paremmaksi. Sulkujen siirto on siis vartenotettava vaihtoehto tulevaisuudessa toteutettavaksi muutostyöksi.

#### 4.5 Muutoskohteiden suunnittelu

Simuloinneista lupaavimpia tuloksia antoi virtausta tasaava elementti alkuperäistä vikaa ajatellen. Muut pienet muutostyöt niiltä osin kuin ne antoivat lupaavia tuloksia, olivat ne oikeastaan primääri-ilmakanavaa parantavia muutoksia. Ne eivät kuitenkaan vaikuttaneet puhaltimien toiminnan kannalta olennaisesti. Toteutettavaksi muutoskohteeksi rajattiin imupuolen virtauksen tasaaja, koska imupuolella oli ratkaiseva vaikutus puhaltimien toimintakyvyn kannalta. Muut muutostyöt ovat helposti toteutettavissa ilman suurempaa suunnittelua niiden yksinkertaisuudesta johtuen.

Virtausta tasaava elementti päätettiin esittää toteutettavaksi vain toiseen puhaltimeen, jolloin säästettäisiin valmistuskustannuksissa. Elementtien asennus suunniteltiin toteutettavaksi puhaltimeen 2, koska sen imupuolen putki oli alkuperäisessäkin tilanteessa suoralinjaisempi. Puhallin 2:n imupuolella oli äänenvaimentimen jälkeen vain yksi mutka. Sen sijaan puhallin 1:ssä mutkia ennen puhallinta oli kolme.

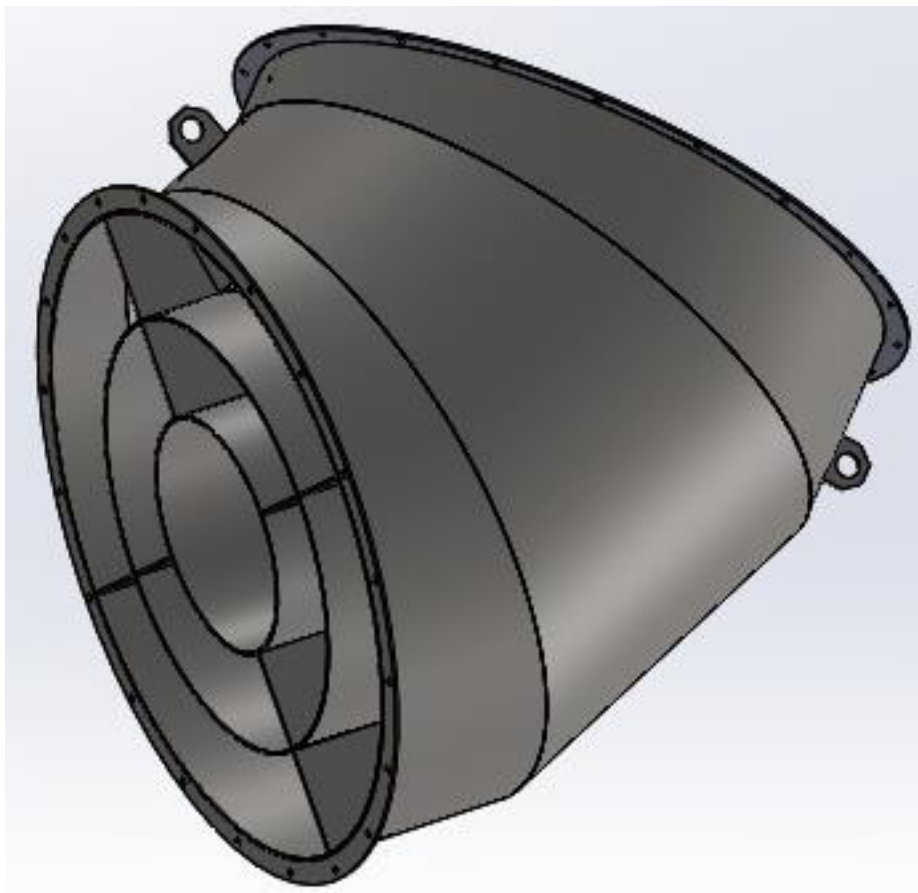
Virtausta tasaavaa elementtiä alettiin suunnitella malliin asetetun geometrian pohjalta. Tasaaja tuli suunnitella käytännölliseksi sen huollettavuuden ja toimivuuden kannalta. Tasaaja päätettiin toteuttaa kahdella samanlaisella toisiinsa liitettävällä 45-asteen elementillä sen massiivisen koon takia. (Kuva 38.) Kahdessa elementissä tehtynä myös sen huollettavuus paranee huomattavasti.

Elementin sisäpuoliset hitsausseamat ja rakenteet tuli pystyä tarkistamaan sisäpuolelta visuaalisesti sekä tunkeuma aineen avulla ongelmitta. Elementit suunniteltiin liitettäväksi toisiinsa laippaliitoksilla. Rakenteeltaan elementti päätettiin tehdä ainevahvuudeltaan vahvemmassa teräksestä alkuperäiseen imuputkeen nähden. Tällä pyrittiin lisäämään varmuutta puhaltimen käytön kannalta. Elementin osien irtautuessa olisi vaarana koko primääripuhaltimen vaurioituminen.



Elementin materiaalina päätettiin käyttää samaa teräslaatua kuin alkuperäisessä rakenteessa. Alkuperäinen materiaali oli merkitty kanaviston piirustuksiin Fe37b teräslaaduksi. Fe37b on SFS 200 (1986) -standardin mukainen teräslaadun nimike, ja sen vastaava standardin SFS-EN 10025-2 (2004/12) mukainen nimike on S235JRG2. S235JRG2 on tavallisesti käytetty rakenneteräs, joka on vähimmäismuovituslujuudeltaan 235 MPa [8, s. 1062 ja 1065.]

Tasaajan elementit suunniteltiin päämitoiltaan alkuperäisten piirustusten mittojen mukaisesti SolidWorks-ohjelmistoa apuna käyttäen.

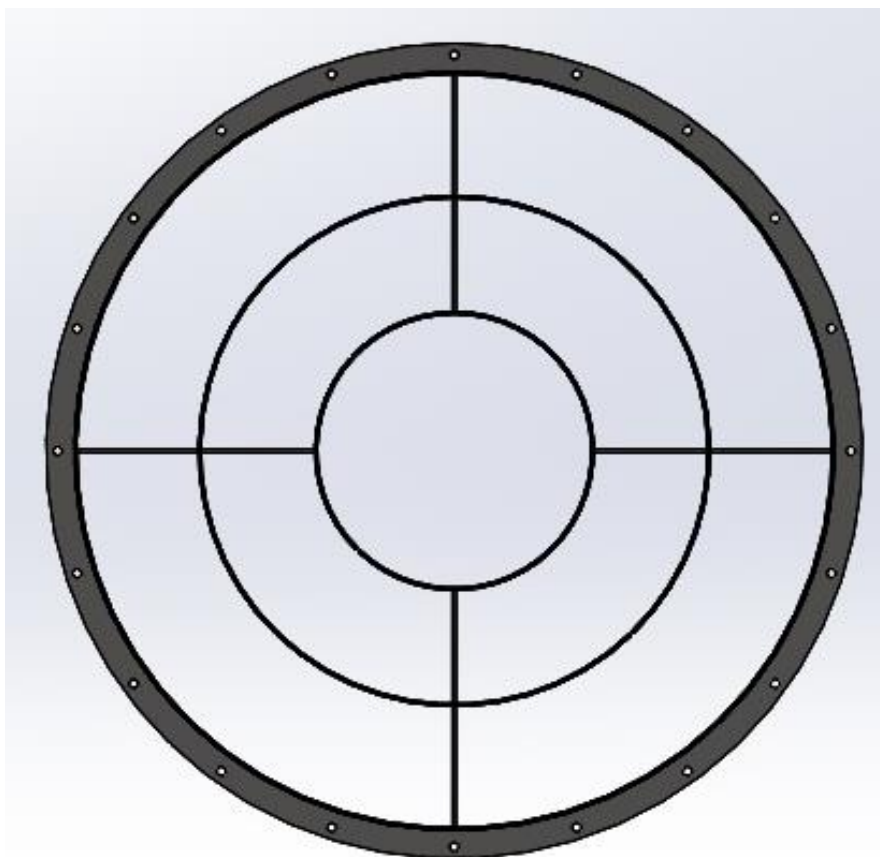


Kuva 38. Tasaajan elementti.

Tasaajan elementti suunniteltiin tehtävän teräslevyistä valmistettavista osista. Näin elementin kaikki osat pystyttäisiin valmistamaan tehokkaasti CNC-polttoleikkaamalla. Elementti koostuu kolmesta sisäkkäisestä polviputkesta, niitä kannattelevista jakolevyistä, kahdesta laipasta sekä kahdesta nostokorvakosta. Polviosat voidaan leikata levityskuvan avulla, jonka jälkeen ne mankeloidaan pyöreiksi.

Polviosien seinämävahvuudeksi määritettiin kuusi millimetriä ja niiden hitsaus määritettiin läpihitsattavaksi. Tällöin hitsausseamat noudattavat perusaineen seinämävahvuuden mukaista lujuutta. Alkuperäisen imuputken seinämävahvuus sen sijaan on neljä millimetriä. Polviosia kannattelevat ja virtaavaa tilaa jakavat jakolevyt päätettiin tehdä laippojen ja nostokorvakoiden kanssa samasta kahdeksan millimetrin ainevahvuisesta teräslevystä. Näin tehtynä elementin valmistus onnistuu kokonaisuudessaan kahdesta eri levyvahvuudesta. Tämä helpottaa ja yksinkertaistaa elementin valmistusta käytännössä.

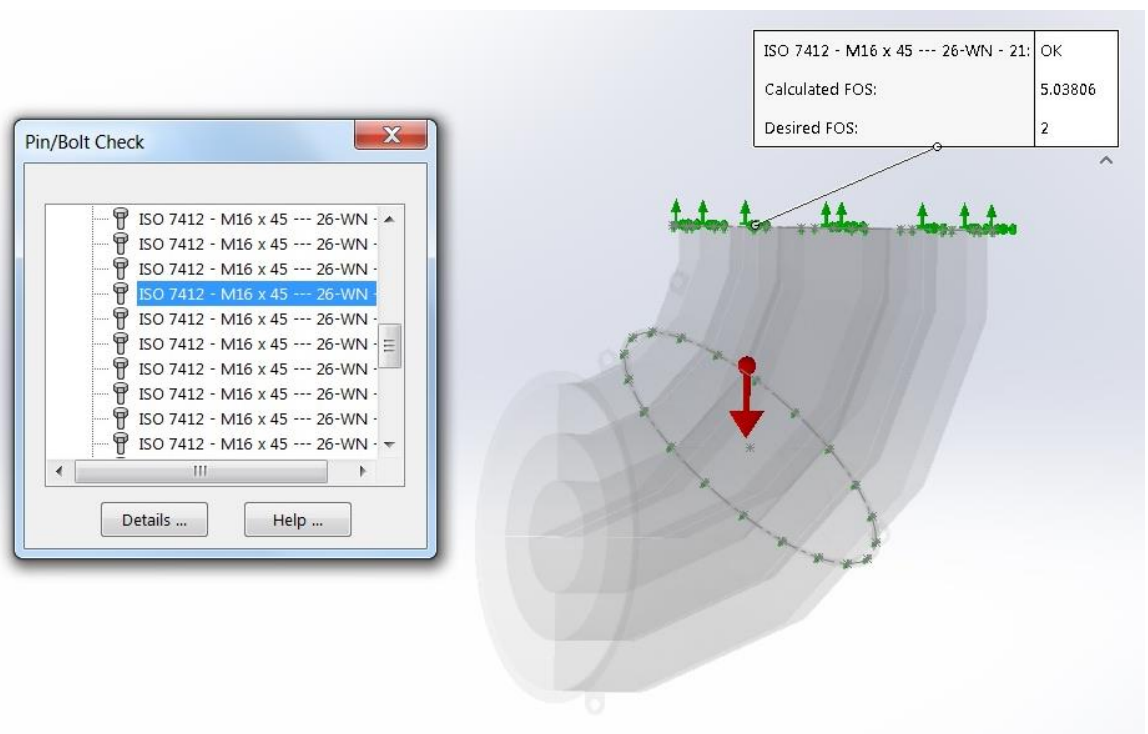
Tasaaja elementin sisäkkäisten putkien jakamalla tilalla pyrittiin tasoittamaan ilman virtausta tasaisemmaksi sen tullessa puhaltimeen. Putken ulkohalkaisija määräytyi alkuperäisen putken mukaan, ja sen halkaisija oli 1634 mm. Sisempien putkien halkaisijaksi määritettiin 1100 mm ja 600 mm, jolloin ne olisivat mahdollisimman tasaisella jaolla leikkausprofiiliin nähden. (Kuva 39.) Sisempien putkien halkaisijamitat havaittiin hyväksi virtaussimulaation tulosten perusteella.



Kuva 39. Elementin leikkausprofiili.

Laippaliitoksessa käytetty pulttikoko (M16) ja lujuusluokka (8.8) asetettiin joka kohtaan samaksi, jotta turhilta nimikkeiltä välttyttäisiin. Pulttien määräksi arvioitiin 20 kpl/liitos jolloin liitoksen tiiviys on helposti toteutettavissa.

Pulttien lujuuslaskenta ja varmuuskertoimet varmistettiin vielä Solidworksin Simulation lisäosalla. Elementit asetettiin malliin asennusvaihetta vastaavalla tavalla, jolloin pultteihin tulee suurimmat jännitykset. Käytännössä elementtien ollessa tuettuna sekä kiinnitettynä imukartioon jännitykset tulevat pienemmään simuloituun tilanteeseen verrattuna. Pulttien pienin varmuuskerroin sijaitsi ylemmän elementin liitoskohdassa, ja silloinkin varmuuskerroin oli vielä noin 5. (Kuva 40.)



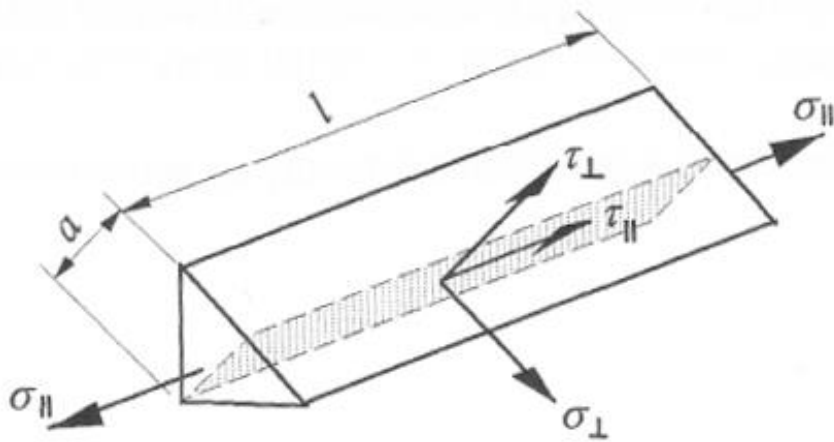
Kuva 40. Pulttien pienin varmuuskerroin.

Lujuusanalyyssissä tarkastettiin vielä rakenteeseen itseensä kohdistuvat sen omasta massasta aiheutuvat jännitykset. Rakenteeseen kohdistuvasta jännityksestä löytyy kuvakaappaus liitteessä 3. Suurin jännityspiikki rakenteessa oli luokkaa 1.56 MPa eli varmuuskerroin rakenteen myötölujuuteen (235 MPa) olisi tällöin vielä 151 (Kaava 8).

$$Vk = \frac{\sigma_{wsall}}{\sigma_{ver}} = \frac{235MPa}{1,56MPa} \approx 151 \quad (8)$$

Hitsausaumojen vahvuudet määritettiin kulumisen takia suhteellisen suuriksi. Tällä pyrittiin saamaan varmuutta sille, että hitsatut osat eivät pääse kulumisen takia irtoamaan. Päittäisliitokset määritettiin läpihitsattaviksi.

Nostokorvakot määritettiin alustavasti hitsattaviksi ympäriinsä kolmen millimetrin  $a$ -mitalla. Tämän jälkeen varmistettiin, että sauma täyttää halutun varmuuskertoimen nostotilannetta varten. Nostokorvakon varmuus haluttiin vähintään seitsemänkertaiseksi. Nostokorvakoiden pienasaumojen jännityksiä laskiessa tuli määrittää pienasauman jännityskomponentit. (Kuva 41.)



Kuva 41. Pienasauman jännityskomponentit.

Pienasauman vertailujännitys määräytyy kaavan 9 mukaisesti. [9, s. 15.]

$$\sigma_{ver} = \beta \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \quad (9)$$

Koska pienasauman määräävä poikkileikkaus on 45 asteen kulmassa on silloin  $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp}$ . Sauman pituussuuntaista voimaa ei ole joten  $\tau_{\parallel}$  on 0

$$\sigma_{ver} = \beta \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\sigma_{\perp}^2)}$$

$$\sigma_{ver} = \beta \sqrt{4(\sigma_{\perp}^2)}$$

$$\sigma_{ver} = 2\beta\sigma_{\perp}$$

Pienahitsin määrävän poikkileikkauksen kohtisuorainen jännitys  $\sigma_{\perp}$  (Kaava 10).

$$\sigma_{\perp} = F * \frac{\cos(45)}{2la} = (900 * 9,81)N * \frac{\cos(45)}{2*120mm*3mm} \approx 8,67MPa \quad (10)$$

S235 lujuuskerroin  $\beta = 0,7$ . [9, s15.]

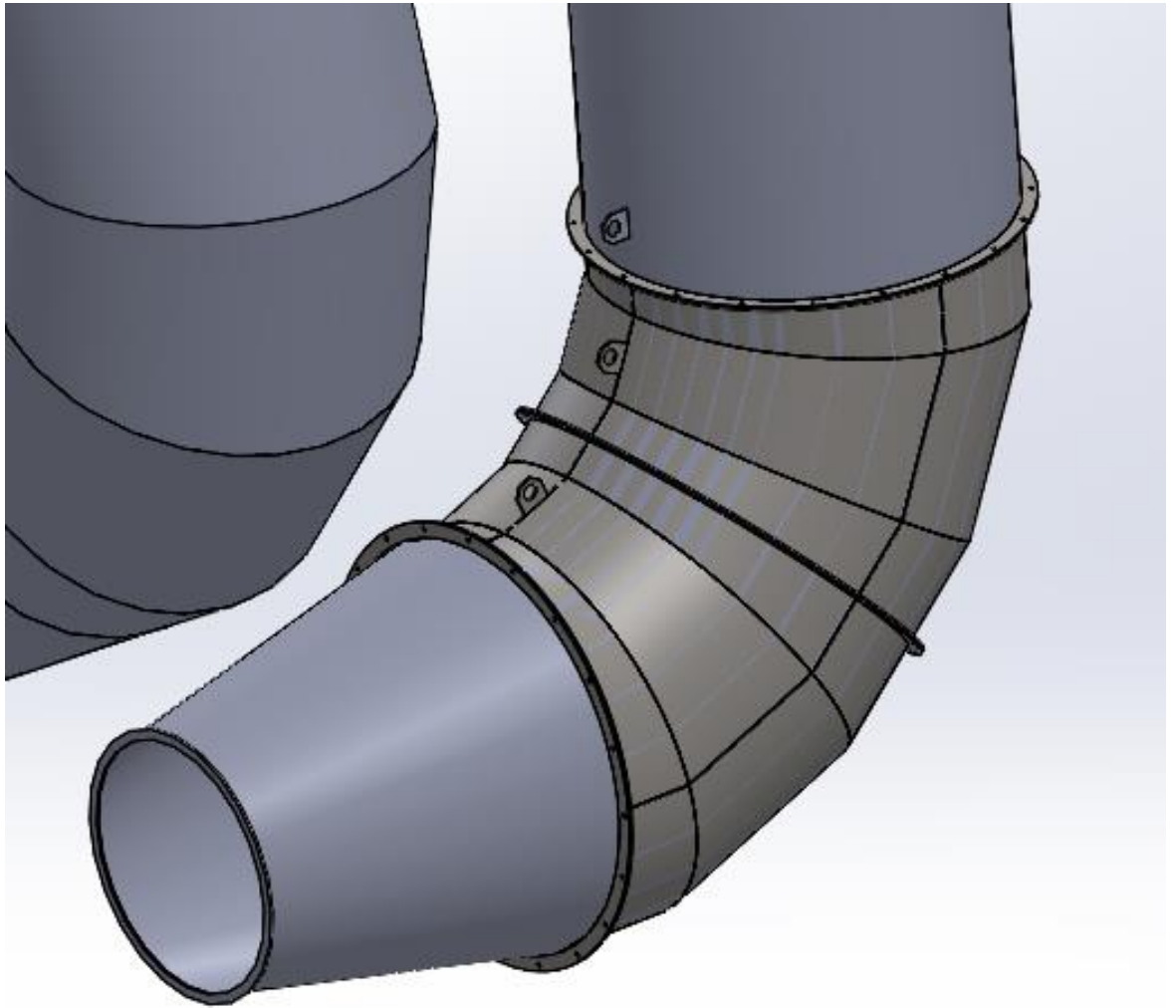
$$\sigma_{ver} = 2 * 0,7 * 8,67MPa = 12,138MPa$$

Jännityksen vertailuarvo  $\sigma_{ver}$  ei saa ylittää materiaalin sallittua hitsaussauman jännitysarvoa  $\sigma_{wsall}$ . Taulukon mukaan S235 sallittu hitsaussauman jännitysarvo on alle 16 mm paksussa materiaalissa 120 MPa. Tällöin hitsaussauman varmuuskerroin määräytyy kaavan 11 mukaan. [9, s. 16 ja 19.]

$$Vk = \frac{\sigma_{wsall}}{\sigma_{ver}} = \frac{120MPa}{12,138MPa} \approx 9,89 \quad (11)$$

Todellisuudessa hitsausaineen lujuus on suurempi kuin perusaineen lujuus, mutta hitsaussaumojä lujuusteknisesti mitoittaessa voidaan käyttää perusaineen lujuutta. Tällöin hitsaussauman varmuuskerroin on aina varmemmalla puolella.

Käytännössä nosto tapahtuu kahdella nostokorvakolla, jolloin jännitys korvakkoa kohti on enää puolet. Varmuuskerroin on kuitenkin laskettu niin, että elementtiä voidaan tarvittaessa nostaa yhdestä korvakosta. Korvakoita voidaan käyttää hyväksi asennuksen yhteydessä. Elementin yläpuolella sijaitsevaan kiinteään imu-putkeen hitsataan vastaavanlaiset korvakot elementin nostoa ja huoltotoimenpiteitä varten. (Kuva 42.)



Kuva 42. Tasaaja elementit ja korvakot paikallaan.

Vanha imuputki leikataan sopivaksi elementin mittojen mukaan ja liitoskohtiin hitsataan vastaavat laipat kuin elementeissä. Ennen vanhan putken leikkaamista tulee imuputken tuenta varmistaa.

## 5 MUUTOSTYÖN KUSTANNUKSET JA SÄÄSTÖT

Investoinnin kannattavuuden kannalta tulee huomioida sen aiheuttamat kustannukset ja säästöt. Virtauselementtien lopullisia tuloksia ei opinnäytetyön tekovaiheessa pysty tietämään, koska muutokset toteutetaan myöhemmin. Lopputuloksien kannattavuutta on kuitenkin järkevää arvioida etukäteen. Kainuun Voiman toimihenkilöiltä löytyi valmiit laskelmat säästöistä, jotka toteutuisivat kattilan ilmansyöttöä yhdellä puhaltimella ajettaessa.

Työn onnistuessa ja mahdollisen vian poistuessa Kainuun Voima säästää n. 7000 €/kk niiltä kuukausilta, kun kattilan ilmansyöttöä ajetaan yhdellä puhaltimella. Säästö muodostuu puhaltimen pois jäävästä tehosta ja jäljelle jääneen puhaltimen hyötysuhteen paranemisesta. Ilmansyötön yhdellä puhaltimella tapahtuvat ajamiset ajoittuvat ajanjaksoille, jolloin kattilan polttoainekuormat ovat pieniä.

Voimalaitoksen käyttötason ja höyryntuotannon tarpeen pientymisestä johtuen tämänkaltaisia ajokuukausia on vuodessa neljästä kuuteen. Tästä johtuen säästö vuositasolla on 28000 - 42000 €. Työssä suunniteltujen virtauselementtien aiheuttamat kokonaiskustannukset Kainuun Voimalle olisi 11000 €. Investointina virtauselementit maksavat siis itsensä takaisin alle kahdessa pienellä kuormalla ajettavassa kuukaudessa. Myöhempiä juoksevia kuluja investoinnista aiheutuisi sen kunnossapidon osalta, mutta nämä ovat oletettavasti luonteeltaan kertaluontoisia ja pitkillä aikaväleillä.

Muutostyö olisi investointina kannattava. Tosin kriittisesti ajateltuna lopullisia tuloksia ei tiedetä varmuudella kuin vasta muutostyön toteutumisen jälkeen. Kuitenkin kustannukset huomioon otettaessa ei investointi ole niin kallis, etteikö sitä kannattaisi kokeilla. Työn loppuvaiheessa virtauselementin osat oli laitettu Kainuun Voiman puolesta tilaukseen.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyö tuli vastaan työharjoittelun aikana Kainuun Voimalla. Työn tavoitteena oli tutkia ja pohtia mahdollisia ratkaisukeinoja kiertopetikattilan primääri-ilmanaviston ja sen puhaltimien muodostavassa kokonaisuudessa esiintyviin ongelmakohtiin. Kohteen ensisijaisena ongelmana oli voimakkaat aksiaaliset iskut puhaltimessa, ilmansyöttöä yhdellä puhaltimella ajettaessa.

Työ suunniteltiin suoritettavaksi nykyaikaisilla virtaus- sekä 3D-mallinnusohjelmistoilla. Työ jakautui selkeästi eri vaiheisiin ja se aloitettiin mallintamalla nykyiset kanavistot niiden omien piirustusten mukaisesti 3D-muotoon. Mallinnus toteutettiin piirustusten mukaisten osakokoonpanojen mukaan, jotka yhdistettiin myöhemmin yhdeksi kokoonpanoksi.

Mallinnuksen jälkeisessä vaiheessa työhön määritettiin parametreja niin, että ilmavirtaukset vastaisivat mahdollisimman paljon reaalitylannetta. Työssä tätä vaihetta kutsutaan simulointivaiheeksi. Parametrien pohjalta tietokone laski virtauksien muodostumisen ja tähän vaiheeseen kului aikaa useita satoja tunteja. Laskenta aika näin suurelle kokonaisuudelle ja monelle eri konfiguraatiolle kulutti jo itsessään aikaa. Tämän lisäksi laskenta jouduttiin toteuttamaan useaan kertaan, koska monesti parametrien syötöissä tapahtuneet virhearviot huomattiin vasta laskennan lopputuloksista.

Lopullisten simulointitulosten jälkeen aloitettiin fluidivirtauksien analysointi. Analysointivaiheessa kanavistosta haettiin ensisijaisesti aksiaalisia iskuja aiheuttavaa vikaa, mutta myös muita ongelmakohtia pyrittiin huomioimaan. Analysointivaiheessa tuloksia tarkasteltiin eri parametrien visuaalisten kuvantojen perusteella. Ongelmakohtien ollessa selvillä niihin suunniteltiin muutuskokeilut ja ne simuloitiin kertaalleen, että niiden vaikutukset voitaisiin nähdä. Muutuskokeiluista karsittiin pois huonoiten onnistuneet ja arvottomimmat kokeilut. Tämän jälkeen keskityttiin jalostamaan vain lupaavinta ratkaisua.



Lupaavimmaksi ratkaisuksi jäi puhaltimia ennen asetettu virtauksia tasaava elementti, ja seuraavassa vaiheessa aloitettiin tämän elementin suunnittelu. Suunnittelun alkuvaiheessa elementti pyrittiin suunnittelemaan käytännölliseksi sen käytön ja huollettavuuden kannalta. Perustuen mietintöihin elementille suunniteltiin muoto ja malli, jonka jälkeen se mallinnettiin 3D-malliksi. Elementti pyrittiin suunnittelemaan myös valmistusteknisessä mielessä helposti toteutettavaksi. Elementtiä tarkasteltiin lopuksi lujuusteknisessä mielessä sekä käsin laskemalla, että lujuusanalyysiohjelmistoja apuna käyttäen.

Investoinnin kustannuksien ja säästöjen osalta työ todettiin kannattavaksi toteuttaa. Virtauselementtien osat on Kainuun Voiman toimesta laitettu tilaukseen ja muutostyö aiotaan toteuttaa lähiaikoina.

## LÄHTEET

- [1] Sykloni (WWW-lähde). Viitattu 22.2.2017. [https://fi.wikipedia.org/wiki/Sykloni\\_\(laite\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Sykloni_(laite))
- [2] Lämpöpintojen puhdistus ja korroosio Kainuun Voima Oy:n kiertopetikattilassa (WWW-lähde). Viitattu 2.3.2017. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201002242486>
- [3] Çengel Y, Cimbala J. Fluid mechanics. 3rd ed. New York: McGraw-Hill; 2014.
- [4] Courant-Friedrichs-Lewy condition (WWW-dokumentti). Viitattu 20.1.2017. [https://en.wikipedia.org/wiki/Courant%E2%80%93Friedrichs%E2%80%93Lewy\\_condition](https://en.wikipedia.org/wiki/Courant%E2%80%93Friedrichs%E2%80%93Lewy_condition)
- [5] Minimizing system effect (WWW-dokumentti). Viitattu 20.1.2017. <http://www.achrnews.com/articles/96369-minimizing-system-effect>
- [6] Understanding Fan System Effects (WWW-lähde). Viitattu 20.1.2017. <http://www.greenheck.com/library/articles/11>
- [7] Equivalent diameter (WWW-dokumentti). Viitattu 20.1.2017. [http://www.engineeringtoolbox.com/equivalent-diameter-d\\_205.html](http://www.engineeringtoolbox.com/equivalent-diameter-d_205.html)
- [8] Valtanen E. Tekniikan Taulukkokirja. 20th ed. Genesis-Kirjat Oy; 2013.

[9] Heikkinen M. hitsausliitokset\_v2. Presentation presented at; 2015; Kajaanin AMK.

## LIITTEET

Liite 1: Kiertopetikattilan dokumentit

Liite 2: Kuvia primääri-ilmapuhaltimista

Liite 3: Virtausta tasaavan elementin rakenteeseen kohdistuvat jännitykset

KÄYTTÖ-OHJE  
Pyroflow-kattila 100 kg/s  
Kainuun Voima Oy

MAPPI I

27.4.1989

2 ( 25 )

## Kattilan kaasuvirtaukset

Piste	A	B	C	D
-------	---	---	---	---

Palamisilmamäärä	m <sup>3</sup> n/s	81.4	51.5	89.4	45.0
------------------	--------------------	------	------	------	------

## Painehäviöt

Piste	A	B	C	D
-------	---	---	---	---

**KÄYTTÖ-OHJE**  
Pyroflow-kattila 100 kg/s  
Kainuun Voima Oy

MAPPI I

27.4.1989

3 ( 25 )

**Ilmapuoli**

		A	B	C	D
		Prim.	Prim.	Prim.	Prim.
Kanavat + ilmanmit.	Pa	390	310	820	280
Höyryluvo	Pa	<del>- P015</del>	<del>PELUSTA</del>	<del>ABC</del>	<del>—</del> 200
<u>Luvo</u>	<u>Pa</u>	<u>680</u>	<u>540</u>	<u>1440</u>	<u>510</u>
Poltin	Pa	12460	11850	15200	11370
Yhteensä	Pa	13530	12700	17460	12660

**Ilma**

Kattilahuoneessa °C 35

