

Aleksi Kemppainen

KUOPPALEVYN ILMAKUIVAUKSEN HALLINTA

KUOPPALEVYN ILMAKUIVAUKSEN HALLINTA

Alexi Kemppainen
Opinnäytetyö
Kevät 2017
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Aleksi Kemppainen
Opinnäytetyön nimi: Kuoppalevyn ilmakeivauksen hallinta
Työn ohjaajat: Esa Kontio ja Markku Sipilä
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2017 Sivumäärä: 35 + 14 liitettä

Työssä laadittiin Excel-pohjainen laskentatyökalu ja ohjeistus virtauslaskentaan Ginolis Oy:lle. Laskentatyökalun tavoitteena oli hallita kuivainlaitteiston toimintaa, kun vaaditaan normaalista poikkeavaa virtausnopeutta kuoppalevyjen kuljettamille näytteille. Ohjeistuksella virtaustekniisiin laskelmiin pyritään nopeuttamaan suunnittelijoiden työtä, kun suunnitellaan sovelluksia, joissa virtaustekniisiä ilmiöitä esiintyy.

Kyseessä oli projektiluontoinen työ, joka aloitettiin tutustumalla ilmavirtauksen käyttäytymiseen teoriatasolla. Kuivainlaitteiston suunnitteluun käytettiin CAD-ohjelmistoa, joten teoreettisen tarkastelun lisäksi käyttöön otettiin simulaatiotyökalu virtausanalyysin nopeuttamiseksi. Projekti jaettiin mekaniikkasuunnitteluun, simulointiin, simulaatiotulosten analysointiin ja ohjeistuksen kirjoittamiseen. Excel-taulukon tekeminen pystyttiin aloittamaan vasta, kun laitteiston rakenteeseen ei enää tehty muutoksia, sillä rakenteelliset muutokset vaikuttavat huomattavasti virtaustekniisiin laskelmiin. Laskentataulukon käytännön toimivuutta ei ollut mahdollista todistaa opinnäytetyön aikana puutteellisten mittalaitteiden vuoksi.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi toimiva kuivainlaitteisto kuoppalevyjen ilma-kuivaukseen, perusteellinen ohjeistus virtaustekniisiin laskelmiin ja yksinkertainen laskentatyökalu kuivainlaitteiston toiminnan hallitsemiseen. Laskentatyökalu perustuu tilavuusvirtojen ja painehäviöiden välillä olevan epälineaarisen yhteyden tarkasteluun. Virtaustekniset yhtälöt ovat erittäin epälineaarisia, joten luotettaviin analyyseihin on käytettävä virtaustekniikkaan erikoistuneita simulaatio-ohjelmistoja.

Asiasanat: virtaustekniikka, virtausanalyysi, kuoppalevy

ALKULAUSE

Haluan kiittää Ginolis Oy:n tuotantojohtajaa, Markku Sipilää tästä upeasta mahdollisuudesta työskennellä nykyaikaisen teknologian parissa. Kiitän myös työn ohjaajaa, Esa Kontiota tuesta ja neuvoista vaikeina aikoina. Erityisen suuret kiitokset annan lisäksi Ginolis Oy:n mekaniikkasuunnittelija Petri Rimpeläiselle, joka antoi kymmeniä pieniä, mutta tärkeitä vinkkejä suunnittelutyöhön, vaikka oli hurjan kiireinen työnsä parissa.

Opinnäytetyöprojekti oli erittäin haastava, sillä minulla ei ollut ollenkaan kokemusta virtaustekniikasta eikä Flow Simulation -virtausanalyysiohjelmistosta. Lisäksi opinnäytetyöhön liittyvät alkutiedot olivat pelkkiä tiedonmurusia ja osa alkuperäisistä komponenteista jouduttiin hylkäämään tai vaihtamaan projektin aikana. Tämä johti siihen, että aina oli suunniteltava uudet 3D-mallit, tehtävä simulaatiot uudestaan ja taulukoitava tulokset analyysien kera.

Työ sisälsi simulaatioiden lisäksi satoja tunteja 3D-mallinnustyötä, Excel-taulukointia ja virtaustekniikan itseopiskelua. Kuvaavaa on se, että minulla on noin sata sivua käsinkirjoitettuja muistiinpanoja, jotka sisältävät työn kannalta oleellista tietoa. Tämä opinnäytetyö on siis vain pieni kurkistus projektiin.

25.5.2017 Alekski Kemppainen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
2 VIRTAUSTEKNIikka	7
2.1 Virtaus kanavassa	7
2.2 Ilmakanavien painehäviöt	8
2.2.1 Kitkapainehäviöt	8
2.2.2 Kertavastukset	10
2.3 Putkiston kokonaispainehäviö	12
3 KUOPPALEVY JA KUIVAINLAITTEISTO	14
4 VIRTAUSANALYYSI SIMULAATIOTYÖKALUILLA	16
4.1 Solidworks® Flow Simulation -virtausanalyysiohjelmisto	17
4.2 Ansys Fluent -ohjelmisto	17
5 FLOW SIMULATION -OHJELMISTON KÄYTTÄMINEN	19
5.1 Laskenta-alueen määrittäminen	19
5.2 Boundary Conditions (reunaehdot)	23
5.3 Goals (tavoitteet)	25
5.3.1 Lähtöjen tilavuusvirrat	25
5.3.2 Yhtälötavoitteet	26
5.4 Elementtiverkon tiheys	28
5.5 Simulaation ratkaiseminen	28
5.6 Tulokset	30
6 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	34
LIITTEET	35

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Ginolis Oy:lle. Yrityksen toimialana ovat erittäin tekniset automaation ja nesteannostelun ratkaisut, joita käytetään lääketieteen moninlaisiin tarpeisiin. Ginolis Oy:n pääkonttori sijaitsee Oulunsalossa. Toimipisteitä on lisäksi Yhdysvalloissa, Ruotsissa ja Kiinassa. Ginolis Oy ei ole aiemmin työskennellyt virtaustekniikan parissa, joten tämän opinnäytetyön tavoitteena on kehittää Ginolis Oy:n suunnittelijoiden avuksi teoretiseen perustuva laskenta-työkalu ja ohjeistus virtaustekniisiin laskelmiin.

Opinnäytetyö pohjautuu Ginolis Oy:n modulaarisiin mikrokokoonpanoihin, joiden automaattinen syöttölaite kuljettaa lääketieteen näytteitä sisältäviä kuoppalevyjä. Virtaustekniikan ratkaisuja tarvitaan näytteiden kuivausvaiheessa, jolloin jokaiselle näytteelle on saatava tasaiset olosuhteet.

Opinnäytetyössä kehitetään toimiva ratkaisu näytteiden kuivausta varten käyttäen apuna virtausanalyysiohjelmistoa. Lisäksi luodaan Excel-laskentataulukko, jonka avulla kuivainyksikköä voidaan säätää ilman, että näytteiden vaatimat tasaiset olosuhteet muuttuvat. Ohjeistus virtaustekniisiin laskelmiin laaditaan tukemaan suunnittelutyötä tulevaisuudessa.

2 VIRTAUSTEKNIikka

Virtaustekniikka tarkastelee fluidien eli kaasujen ja nesteiden käyttäytymistä le-
vossa ja liikkeessä. Fluidit jaetaan kahteen luokkaan, kokoonpuristuviksi eli kaa-
suiksi ja kokoonpuristumattomiksi, jollaisia ovat useimmat nesteet. (Karinen
2016, 2.)

2.1 Virtaus kanavassa

Kanavassa etenevän ilman nopeus voidaan esittää ilman tilavuusvirran ja mas-
savirran avulla kaavan 1 mukaisesti. (Sandberg – Ripatti 2014, 88).

$$v = \frac{q_v}{A} = \frac{q_m}{\rho A} \quad \text{KAAVA 1}$$

v = ilman nopeus [m/s]

q_v = ilman tilavuusvirta [m³/s]

A = kanavan poikkipinta-ala [m²]

q_m = ilman massavirta [kg/s]

ρ = tiheys [kg/m³]

Ilman virtausta tarkasteltaessa voidaan soveltaa Bernoullin yhtälöä, joka perus-
tuu energian säilymiseen kitkattomassa virtauksessa. Yhtälön mukaan paine-,
asema- ja nopeusenergian summa on vakio joka kohdassa virtausta. Kokonais-
paine p_{kok} voidaan ilmaista yksinkertaisimmillaan kaavalla 2. (Seppänen 1996,
93.)

$$p_{\text{kok}} = p_s + 0,5\rho v^2 = p_s + p_{\text{dyn}} \quad \text{KAAVA 2}$$

P_{kok} = kokonaispaine [Pa]

P_s = staattinen paine [Pa]

P_{dyn} = dynaaminen paine [Pa]

ρ = tiheys [kg/m³]

v = ilman nopeus [m/s]

Virtauksen jatkuvuusyhtälön mukaan (kaava 3) myös massavirta pysyy vakiona,
vaikka kanavan poikkileikkaus muuttuisi. (Seppänen 1996, 94).

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

KAAVA 3

q_m = massavirta [kg/s]

ρ_1, ρ_2 = ilman tiheys [kg/m³]

v_1, v_2 = ilman nopeus [m/s]

A_1, A_2 = kanavan poikkipinta-ala [m²]

Todellisuudessa kanavissa ja putkissa syntyy virtauksen pyörteilyä muotokappaleissa sekä kanavan seinän ja virtaavan ilman aiheuttamasta kitkasta painehäviöitä. (Seppänen 1996, 95).

2.2 Ilmakanavien painehäviöt

Ilmakanavissa syntyvät painehäviöt muodostuvat kitkapainehäviöistä ja kertavastuksien painehäviöistä. Kitkapainehäviöihin vaikuttavat kanavan koko, muoto, pituus ja sisäpinnan karheus. Lisäksi kitkapainehäviöitä aiheuttavat ilman nopeus, tiheys ja viskositeetti. Kertavastuksien painehäviöitä aiheuttavat ilmakanavan muodonmuutokset, kuten käyrät, haarautumat, supistukset ja kanaviston liitännät. Myös ilman nopeus ja tiheys tulee ottaa huomioon laskettaessa kertavastuksia. (Sandberg – Ripatti 2014, 88.)

2.2.1 Kitkapainehäviöt

Kitkallisessa eli todellisessa virtauksessa suorille kanaville ja putkille painehäviö lasketaan kaavalla 4. Painehäviötä vastaava energiamäärä muuttuu lämmöksi. (Seppänen 1996, 95).

$$\Delta p_\lambda = \lambda \frac{L}{d} \times 0,5 \rho v^2$$

KAAVA 4

Δp_λ = painehäviö [Pa]

λ = kitkavastuskerroin

L = kanavan pituus [m]

d = kanavan sisähalkaisija [m]

Kitkavastuskertoimeen vaikuttavat virtauksen laatu ja kanavan ominaisuudet, joita ovat hydraulinen halkaisija, ilman kinemaattinen viskositeetti ja sisäpinnan

karheus. Virtauksen laatu voidaan määrittää selvittämällä Reynoldsin luku kaavalla 5. (Sandberg – Ripatti 2014, 89.)

$$Re = \frac{dv}{\nu}$$

KAAVA 5

Re = Reynoldsin luku

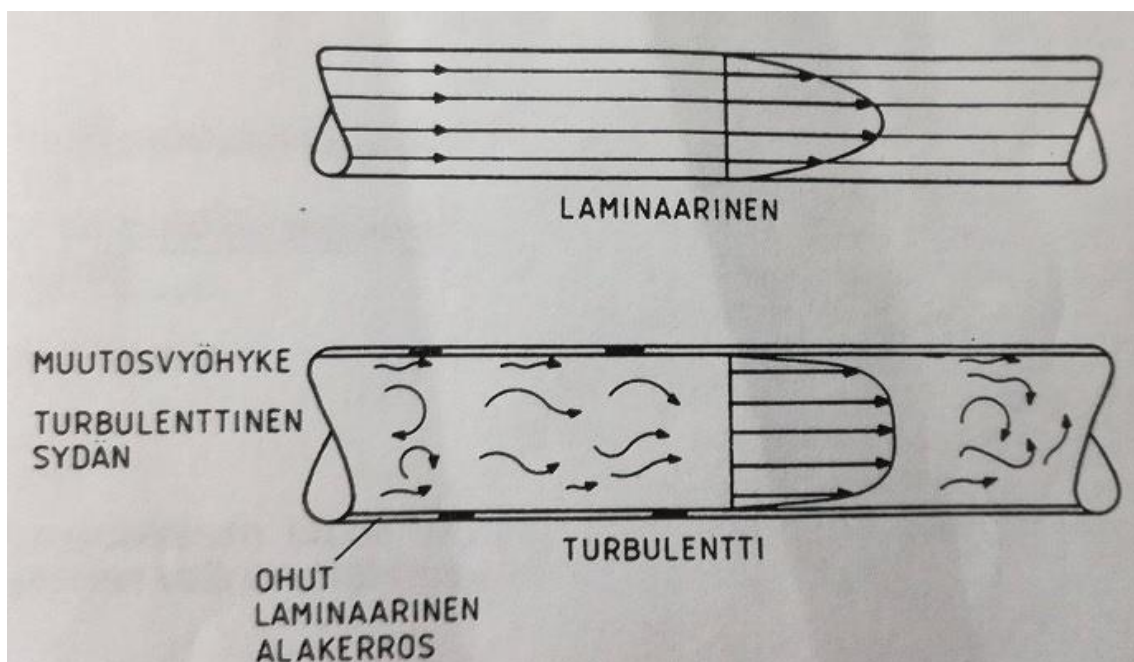
d = kanavan sisähalkaisija [m]

v = virtausnopeus [m/s]

ν = kinemaattinen viskositeetti [m²/s]

Reynoldsin luku kertoo, onko virtaus laminaarista eli tasaista, $Re < 2\,320$ vai turbulენტtista eli pyörteilevää, $Re > 3\,000$. Välissä on siirtymäalue, jossa virtaus voi vaihdella laminaarisesta turbulენტtiseksi ja toisinpäin. Kuvassa 1 selvennetään fluidin käyttäytymistä laminaarisessa ja turbulენტtisessä virtauksessa.

(Sandberg – Ripatti 2014, 89; Seppänen 1996, 95; Putkivirtaus. 2009.)



KUVA 1. Laminaarinen ja turbulენტtinen virtaus (Seppänen 1996, 95)

Täysin laminaarisessa virtauksessa ($Re < 2\,320$) kitkavastuskerroin λ ratkaistaan kaavasta 6. Peltikanaville eli perinteisille ilmanvaihtokanaville kitkavastuskerroin saadaan kaavasta 7, joka on kokeellisesti selvitetty likimääräinen kaava. Se käy myös turbulენტtiselle virtaukselle. (Seppänen 1996, 96.)

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

KAAVA 6

$$\lambda = 0,0072 + \frac{0,61}{Re^{0,35}}$$

KAAVA 7

Jos kanava poikkeaa karheudeltaan k (liite 1) peltikanavasta, käytetään kitkavastuskertoimen määrittämiseen Moodyn käyrästä (liite 2). Monilla valmistajilla on myös valmiita käyrästä kitkapainehäviöille sekä nykyaikaisista kanava-suunnitteluohjelmistoista löytyy mallinnukset useimmille materiaaleille ja kanavavahvuuksille.

Siirtymävyöhykkeellä $2\,320 < Re < 3\,000$ kitkavastuskertoimen määrittäminen on epätarkkaa virtauksen laadun vaihtelun vuoksi. Moodyn käyrästä avulla on kuitenkin mahdollista saada tarpeeksi tarkka arvo.

Turbulenttisella alueella, $Re > 3\,000$ kitkavastuskertoimen voidaan selvittää Colebrookin yhtälöstä kaavalla 8. Yhtälössä kitkavastuskertoimen λ esiintyy sekä vasemmalla että oikealla puolella, ja sen ratkaisu onnistuu ainoastaan iteroimalla eli arvaamalla vastuksen arvoja, kunnes yhtälön molemmille puolille saadaan sama tulos. (Sandberg – Ripatti 2014, 89; Karinen 2016, 14.)

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,0 \log \left(\frac{k}{3,7 d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right)$$

KAAVA 8

λ = kitkavastuskertoimen

k = kanavamateriaalin absoluuttinen karheus

d = kanavan halkaisija

Re = Reynoldsin luku

2.2.2 Kertavastukset

Putkiston erilaiset kanavaosat aiheuttavat painehäviöitä ilman pyörteilyn vuoksi. Kanavistoa suunniteltaessa on pyrittävä minimoimaan ilmavirran suunnanmuutokset ja kanaviston poikkipinnan koon vaihtelut, sillä kertavastuksien laskeminen vaikeutuu huomattavasti, jos rakenneosia asetetaan useita peräkkäin. Esimerkiksi kahden peräkkäisen 90°:n käyrän kertavastuksia ei voi laskea yhteen, sillä ensimmäisen mutkan aiheuttama virtaushäviö vaikuttaa vielä toisessa mutkassa syntyviin painehäviöihin.

Eri kirjallisuuslähteissä kertavastuksia kutsutaan myös paikallisvastuksiksi tai muotovastuksiksi, ja niitä aiheuttavat muun muassa

- putkikäyrät eli eri asteiset mutkat
- supistukset
- laajennukset
- haarautumat
- venttiilit
- mittalaitteet.

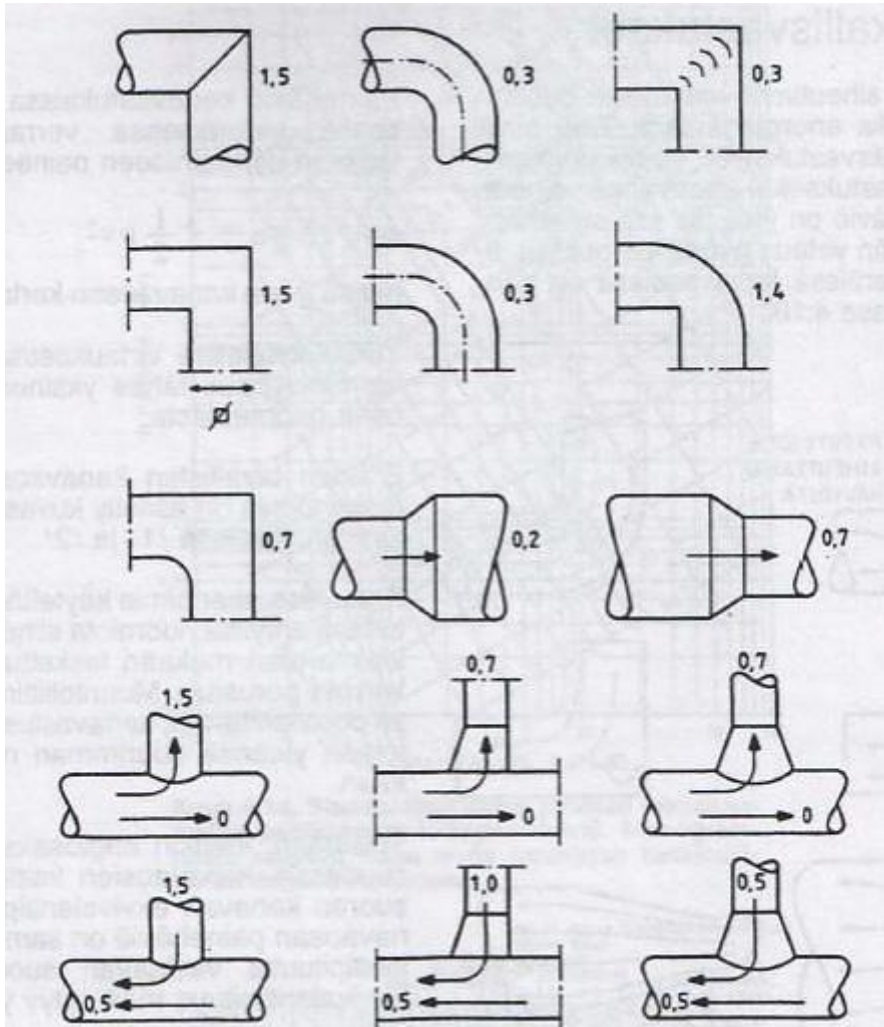
Kertavastuksen aiheuttama painehäviö lasketaan kaavan 9 avulla, ja se on verrannollinen virtauksen dynaamiseen paineeseen. Virtaus kanavaosissa on lähes poikkeuksetta turbulenttista eivätkä kaavat päde laminaariselle virtaukselle. (Putkivirtaus. 2009; Seppänen 1996, 99.)

$$\Delta p_{\zeta} = \zeta p_{dyn} = \zeta \frac{1}{2} \rho v^2$$

KAAVA 9

ζ (zeta) = kertavastuskerroin

Kuvassa 2 on erilaisten kanavaosien likimääräisiä kertavastuskertoimia. Nykyään useat valmistajat myös ilmoittavat kanavavarusteiden painehäviöitä tuotedokumenteissaan. (Putkivirtaus. 2009.)



KUVA 2. Tavallisten kanavaosien likimääräisiä kertavastuskertoimia (Seppänen 1996, 100)

2.3 Putkiston kokonaispainehäviö

Kanaviston kokonaispainehäviö saadaan, kun lasketaan kitkapainehäviöt sekä kertavastusten aiheuttamat häviöt yhteen käyttäen kaavaa 10. (Sandberg – Ripatti 2014, 88).

$$\Delta p_{\text{kok}} = \Sigma \Delta p_{\lambda} + \Sigma \Delta p_{\zeta} = \Sigma \left(\frac{\lambda L}{d} \times \frac{1}{2} \times \rho v^2 \right) + \Sigma \left(\zeta \times \frac{1}{2} \times \rho v^2 \right) \quad \text{KAAVA 10}$$

Δp_{kok} = kokonaispainehäviö [Pa]

Δp_{λ} = kitkapainehäviö yhdellä suoralla kanavalla [Pa]

Δp_{ζ} = kertavastuspainehäviö yhdessä kanavaosassa [Pa]

λ = kitkavastuskerroin

L = kanavan pituus [m]

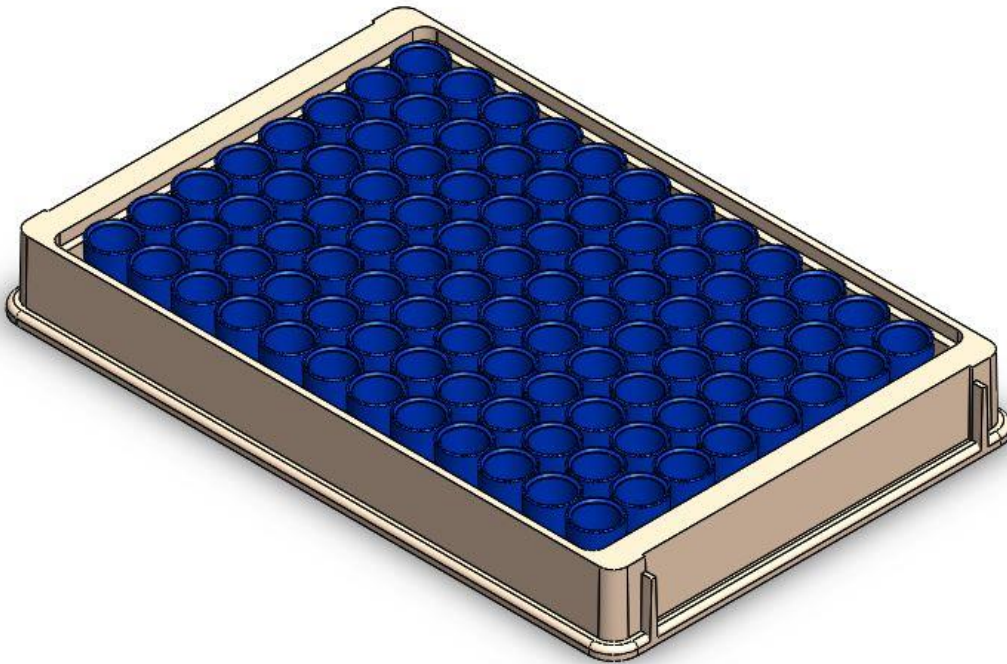
d = kanavan sisähalkaisija [m]

ζ = kertavastuskerroin

3 KUOPPALEVY JA KUIVAINLAITTEISTO

Biokemiallisissa ja immunologisissa tutkimuksissa käytetään useimmiten 96-paikkaista kuoppalevyä, jossa on 8 riviä ja 12 kuoppaa joka rivillä. Yksittäisen näyteastian sisähalkaisija on noin 7,2 mm ja korkeus 10,6 mm.

Laitteistossa kulkee yhtä aikaa useita kuoppalevyjä näytteiden kera, ja opinnäytetyössä jokaiselle näyteastialle ja niiden sisältämälle näytteelle tuli luoda identtiset olosuhteet. Huomioon oli otettava paine, ilman virtausnopeus, ilman lämpötila ja ilman kosteus. Kuoppalevyn rakenne nähdään kuvasta 3.



KUVA 3. Standardimallinen 96-kuoppalevy (Ginolis Oy)

Kuivainlaitteiston rakenne ja toimintaperiaate on tarkoitettu vain toimeksiantajan käyttöön, sillä sitä tullaan käyttämään modifioituna myös tulevilla projekteilla. Kuivainlaitteiston kehitykseen käytettiin 3D-mallinnusta, teoreettista tarkastelua ja simuloituja virtausanalyyssejä.

Kuoppalevyjen tasaiset olosuhteet varmistettiin prototyypivaiheessa muun muassa paine-, ilman kosteus-, ja lämpötila-antureilla. Yksittäisten näytteiden virtausnopeustarkasteluun käytettiin erittäin tarkkaa virtausnopeusmittaria. Kaikki tulokset arkistoiitiin ja analysoitiin.

4 VIRTAUSANALYYSI SIMULAATIOTYÖKALUILLA

Putkiston monimutkaistuessa on otettava käyttöön simulaatio-ohjelmisto, sillä käsin tai edes Excel-laskentataulukolla ei saada riittävän tarkkaa analyysiä tehtyä. Ilmavirralla voi olla satoja erilaisia reittejä, jotka jokainen tulisi laskea erikseen luvun 2 mukaan. Tämä vie aikaa ja virheiden mahdollisuus kasvaa.

Simuloidun virtausanalyysin tuloksiin ei voi luottaa sokeasti, sillä tulokset ovat aina suuntaa antavia ja tulisi varmistaa kokeellisesti. Simulointi on kuitenkin oiva työkalu prototyyppiä suunniteltaessa, sillä sen avulla voidaan nopeasti muuttaa selkeitä ongelmakohtia ilman suuria taloudellisia panostuksia.

Virtausanalyysiohjelmit käyttävät ongelmanratkaisuun FVM eli Finite Volume Method -laskentaa, joka on läheistä sukua FEM eli Finite Element Method -laskennalle. Molemmissa ratkaisutyypleissä tarkasteltava alue jaetaan elementtiverkolla pieniin osiin, joita ohjelma ratkaisee analyyttisesti. Virtaustekniset laskut ovat epälineaarisia, joten tavallinen FEM-laskenta ei tuota riittävän tarkkoja vastauksia. (Difference Between FEA and CFD 2016.)

Tässä työssä käytin Dassault Systèmes Solidworks® 2016 -suunnitteluohjelmistoa 3D-mallintamiseen. Virtaustarkastelua suoritin käyttäen Solidworksiin integroitua Mentor Graphics Corporationin Flow Simulation -virtausanalyysiohjelmistoa. Flow Simulationia tarkempaan ammattilaiskäyttöön suositellaan ANSYS Fluent -ohjelmistoa.

Ilmaisia avoimeen lähdekoodiin perustuvia ohjelmia ovat esimerkiksi OpenFOAM ja SU2, mutta ne eivät suoraan tue 3D-malleja. Molemmissa virtausanalyysin tarkkuus kärsii huomattavasti riippuen kappaleen geometriasta. Ne myös vaativat muun muassa elementtiverkon (mesh) tekemisen alusta loppuun itse muuttamalla lähdekoodia. Toisaalta, koska lähdekoodi on avoin, on mahdollista säätää pienimpiäkin yksityiskohtia mallista.

4.1 Solidworks® Flow Simulation -virtausanalyysiohjelmisto

Solidworks® Flow Simulation simuloi fluidien virtausta 3D-mallissa. Sen avulla voi seurata fluidin liikettä suunniteltavan kappaleen sisä- tai ulkopuolella. Ohjelma sisältää valmiita komponentteja, esimerkiksi puhaltimia ja suodattimia, joita voi myös itse tehdä ominaiskäyrien perusteella suhteellisen helposti.

Ohjelmisto ottaa laskelmissaan huomioon paineen muutokset, lämpötilan vaikutukset, ilman kosteuden ja virtaustyyppin. Simulaation tuloksista käyvät ilmi muun muassa painehäviöt, lämmönsiirtymiset ja -vaihtelut, virtausnopeudet, tiheyden muutokset sekä virtauksen aiheuttamat voimat kappaleessa. Flow Simulation -tulokset voidaan viedä lähtöarvoiksi esimerkiksi lujuuslaskentaa varten.

Flow Simulation soveltuu teollisuuden tarpeisiin erittäin laajalti. Siitä hyötyvät alat, kuten elektroniikka, ilmanvaihto, autoteollisuus, lääketiede, puolustusteollisuus, koneenrakennus sekä ilmailu- ja avaruusteollisuus. (Solidworks, linkit Products -> Simulation -> Solidworks Flow Simulation -> Computational Fluid Dynamics.)

4.2 Ansys Fluent -ohjelmisto

Ansys Fluent on virtaustekniikan ammattilaisten suosima ohjelmistopaketti. Se on täysiverinen simulaatiotyökalu eikä se sovellu hyvin mallintamiseen, sillä mallinnustyökalut ovat rajoittuneet ja käyttöliittymä on karu. (A Comparison of CFD Software Packages 2017.)

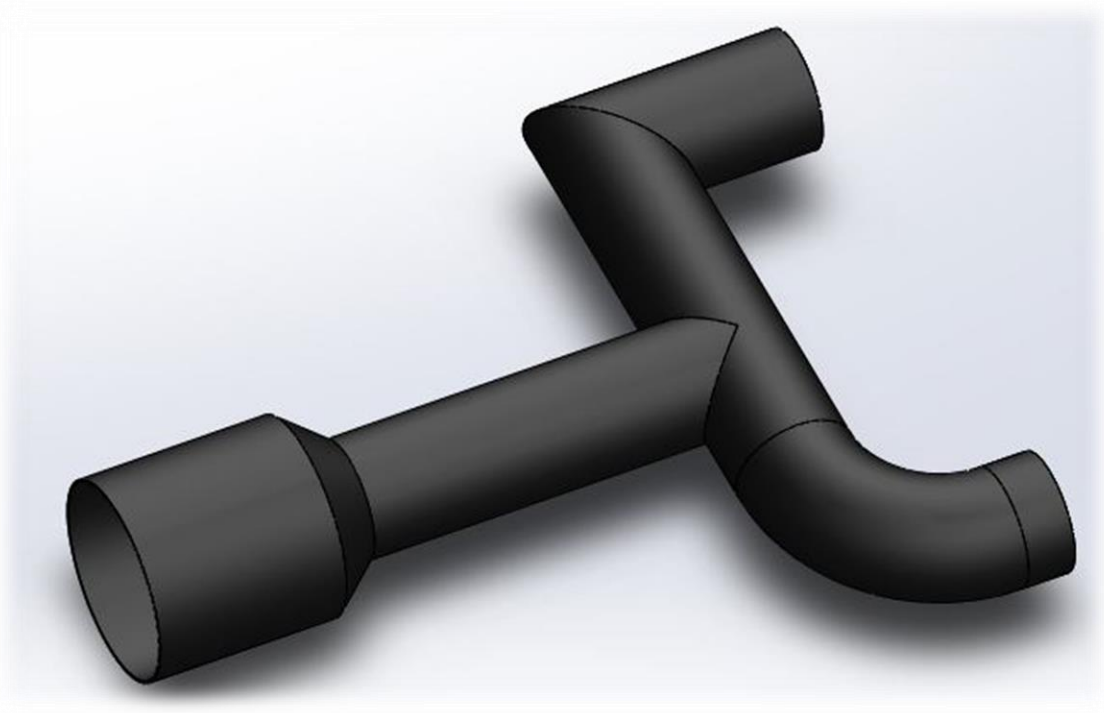
ANSYS Fluent tukee kaikkia yleisimpiä CAD-ohjelmistoja, joten 3D-mallit voidaan tuoda simuloitaviksi sellaisinaan ilman tiedostomuotojen vaihtelua. Tällöin 3D-mallien geometrinen tarkkuus ei muutu.

Flow Simulation on käytännössä aloittelijaversio verrattuna Ansys Fluentiin. Ansys Fluent on tarkempi, nopeampi, muokattavampi, visuaalisempi ja valtavasti monipuolisempi ohjelmisto virtausteknisiin tutkimuksiin. Siinä on kaikki Flow Simulationin ominaisuudet sekä lisäksi muun muassa kemialliset reaktiot, fluidien olomuodon muutokset, akustiikka, palamisen aiheuttamat vauriot sekä

meluhaitat. (Ansys, linkit Products -> Fluids -> CFD Premium -> Ansys Fluent -> Features.)

5 FLOW SIMULATION -OHJELMISTON KÄYTTÄMINEN

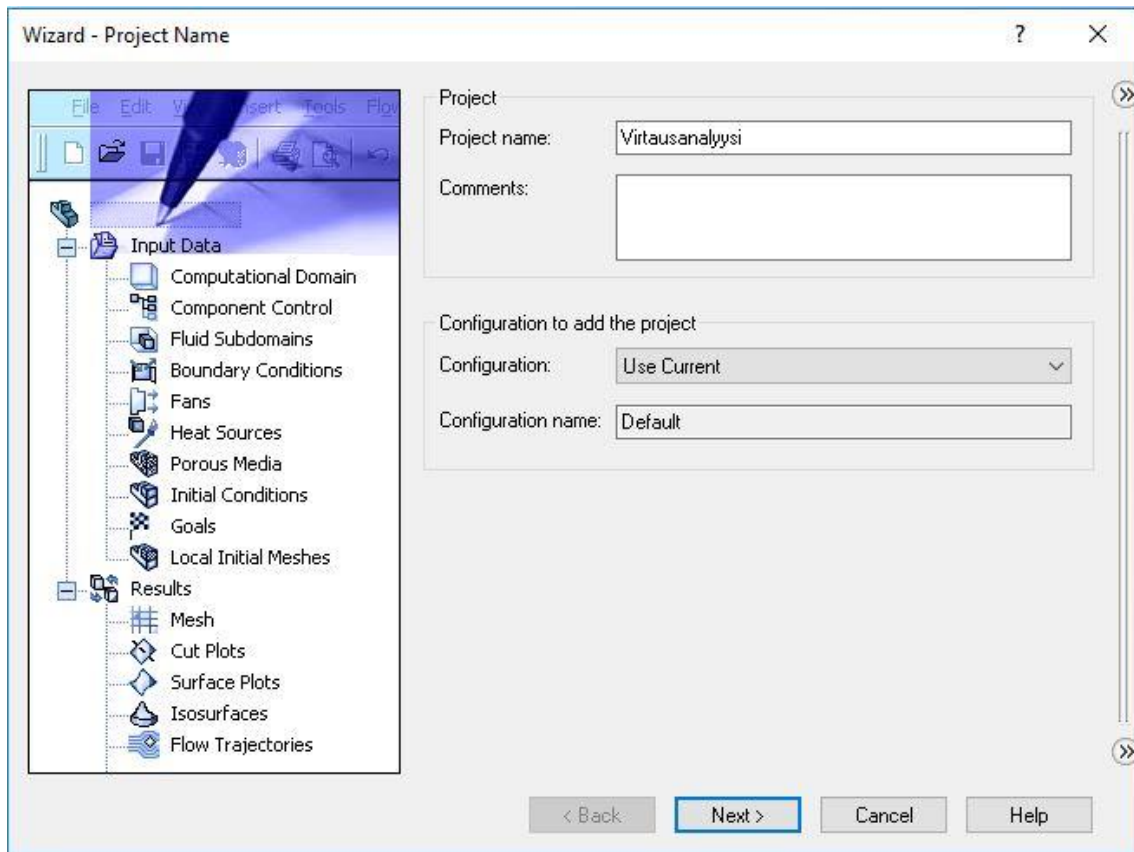
Kappaleen tai kokoonpanon mallintamisen jälkeen avataan Flow Simulation -li-säosa. Esimerkkinä on yksinkertainen putkirakenne, jossa ilmastointiputki aluksi kapenee ja myöhemmin haarautuu kahteen saman halkaisijan omaavaan putkeen. Putken kaikki päät ovat avoimia. Tutkitaan, kuinka mutkan rakenne vaikuttaa ilman etenemiseen putkessa. Kuvassa 4 on tarkasteltava putkisto.



KUVA 4. Putkisto

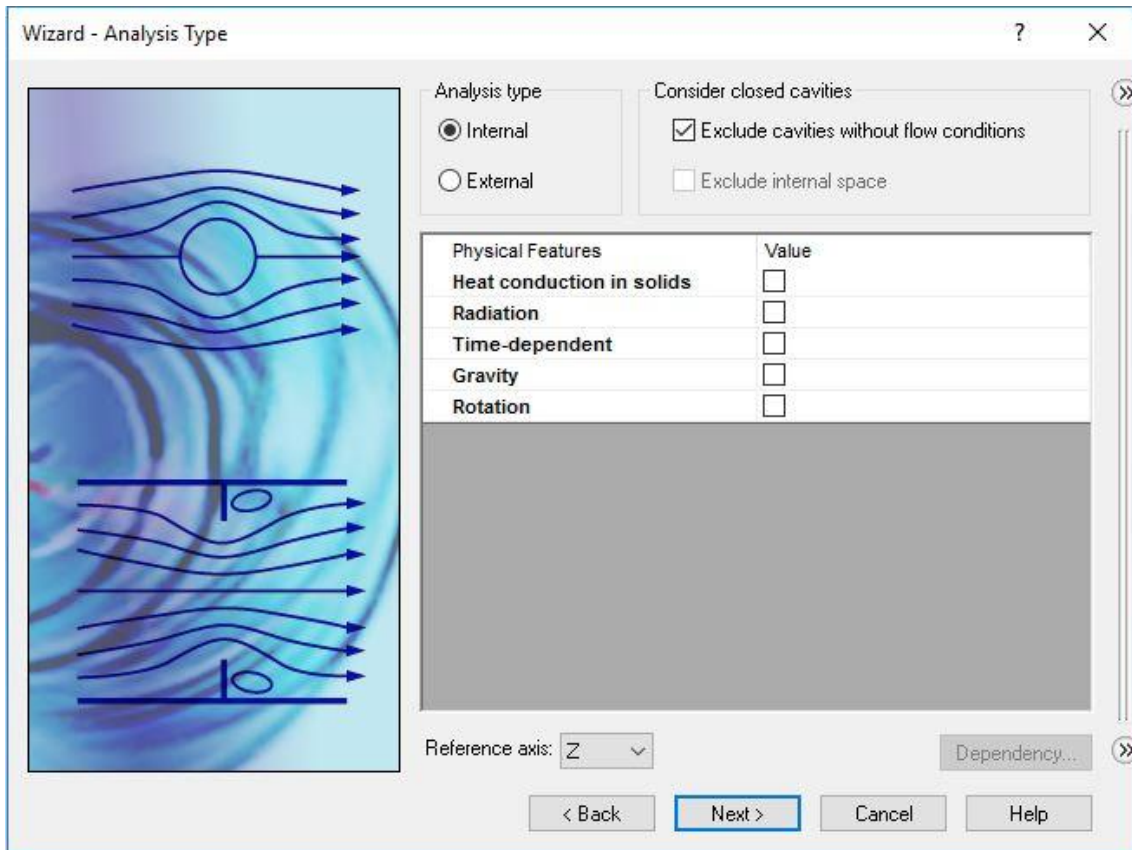
5.1 Laskenta-alueen määrittäminen

Virtausympäristön luominen aloitetaan valitsemalla Wizard ja antamalla projektille nimi sekä valitsemalla haluttu konfiguraatio vetovalikosta (kuva 5). Seuraavassa ruudussa valitaan käytettävä yksikköjärjestelmä, joka on vakiona SI-järjestelmä.



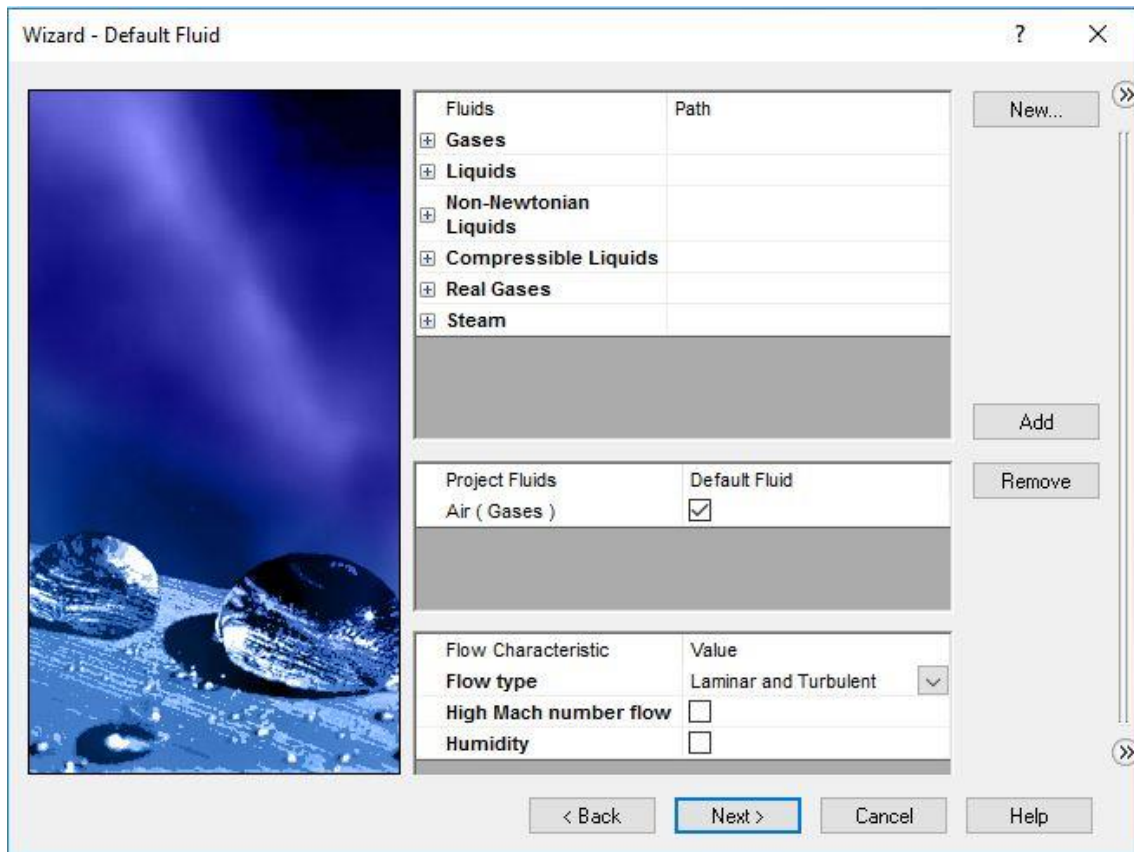
KUVA 5. Projektin nimeäminen

Kolmannessa ikkunassa (kuva 6) valitaan analyysin tyyppi. Esimerkin tapauksessa kyseessä on sisäinen analyysi, sillä tutkitaan vain putkiston sisällä virtaavaa ilmaa. Alhaalta valitaan vertailuakseliksi Z-akseli, koska ilma virtaa sen suuntaisesti. Ulkoinen analyysi tulisi kysymykseen esimerkiksi, jos halutaan tutkia ilman virtausta lentokoneen siiven yli. Tässä ikkunassa voi myös antaa lisätietoja laskentaa varten, jos ennen virtausanalyysia niitä on tiedossa.



KUVA 6. Analyysityyppi

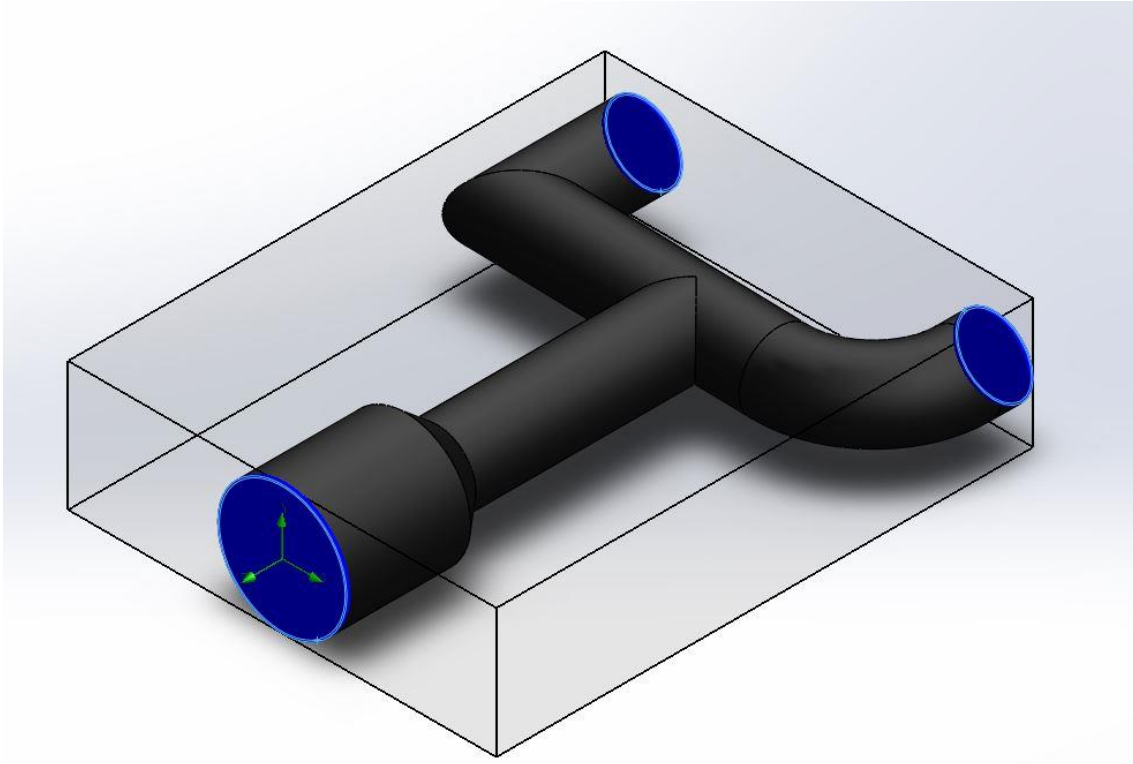
Neljännessä ikkunassa (kuva 7) valitaan tutkittavat fluidit ja virtaustyyppi. Valitaan kaasuista ilma ja virtaustyyppiä laminaarinen ja turbulenttinen virtaus. Tässä vaiheessa muihin ikkunoihin ei tarvitse tehdä muutoksia, vaan hyväksytään painamalla Finish.



KUVA 7. Tutkittavien fluidien valinta

Kirjastossa on valtava määrä erilaisia kaasuja sekä nesteitä, ja tarvittaessa New-valikosta luodaan uusia. New-valikon kautta pääsee tarkastelemaan fluidien ominaisuuksia ja käsiksi koko Flow Simulationin tietokantaan, josta löytyy erilaisia komponentteja ja niiden ominaiskäyriä. Myös näitä voi lisätä tietokantaan käyttäen hyväksi valmistajien datalehtien tietoja.

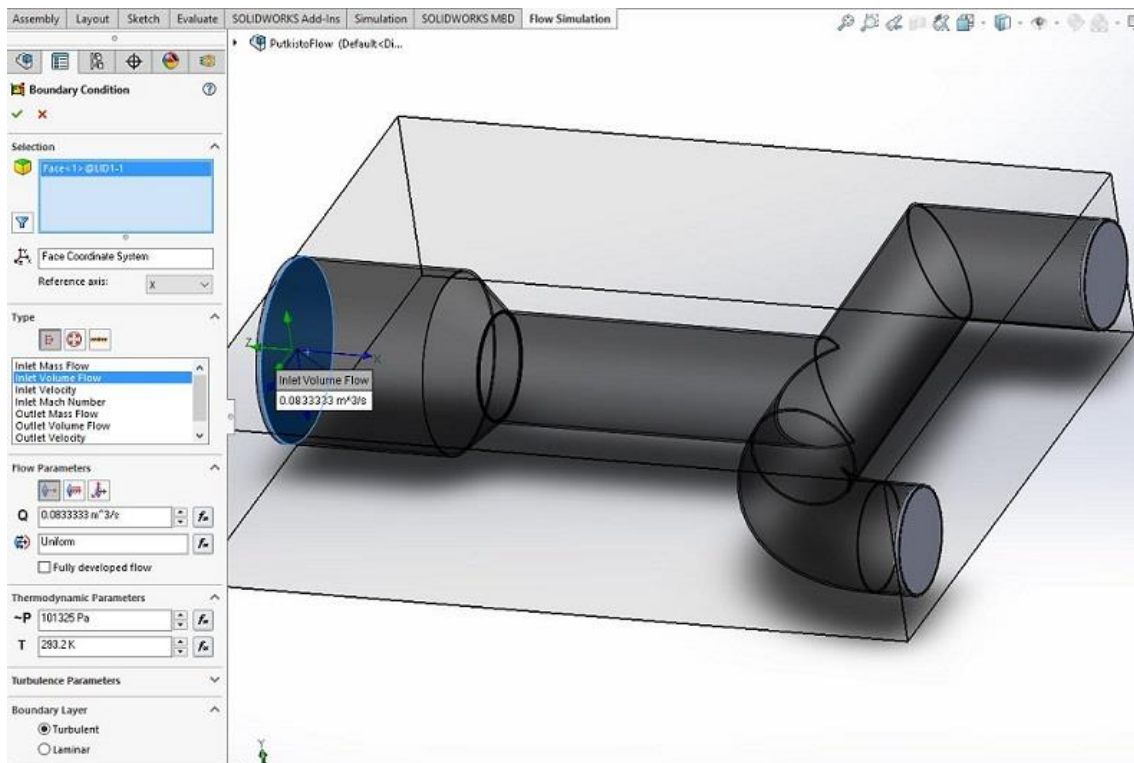
Virtaustarkastelu tehdään suljetulla alueella, joten putkiston kolme avointa reikää tulee peittää kansilla, jotta pystytään analysoimaan putkessa liikkuvaa ilmavirtaa. Avataan Create Lids -työkalu ja valitaan putkien päätypinnat (kuva 8). Vastataan kyllä molempiin avautuviin kysymyksiin. Laskenta-alue on nyt määritetty.



KUVA 8. Kansien luonti Create Lids -työkalulla

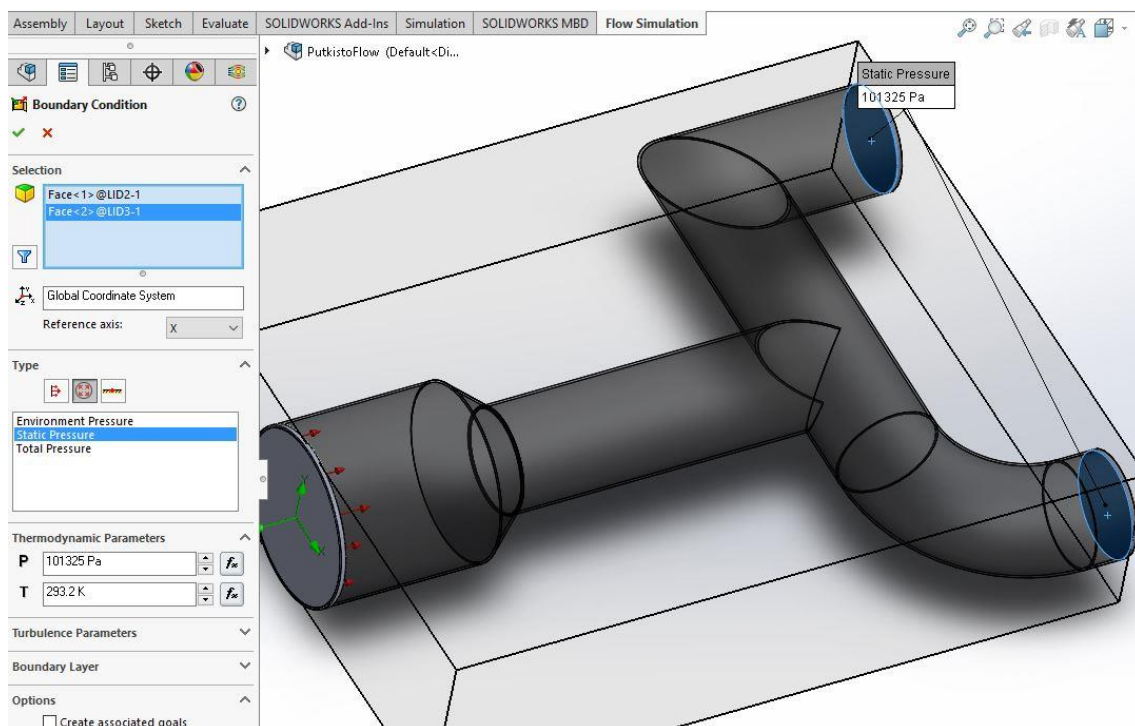
5.2 Boundary Conditions (reunaehdot)

Reunaehdot määritellään avaamalla Flow Simulation Analysis -puusta hiiren oikealla osoittimella insert Boundary Condition ja valitsemalla tuloaukoksi (inlet) kannen sisäpuoli. Katsotaan puhaltimen tuottama tilavuusvirta datalehdeltä ja asetetaan arvo kohtaan Q. Tarvittaessa voi säätää myös termodynaamisia suureita sekä virtaustyyppiä (kuva 9).



KUVA 9. Tuloilman määrittäminen

Lähdöiksi valitaan Boundary Condition -ikkunan kautta molempien pienempien putkien kansien sisäpinnat. Oletetaan, että putken ulkopuolella vallitsevat NTP-olosuhteet, joten valitaan staattinen paine eikä muuteta parametreja, ellei toisin määrätä (kuva 10). Huomataan, että punaiset nuolet kertovat fluidin tulosuunnan ja siniset nuolet näyttävät lähdöt.



KUVA 10. Lähtöjen määrittäminen

5.3 Goals (tavoitteet)

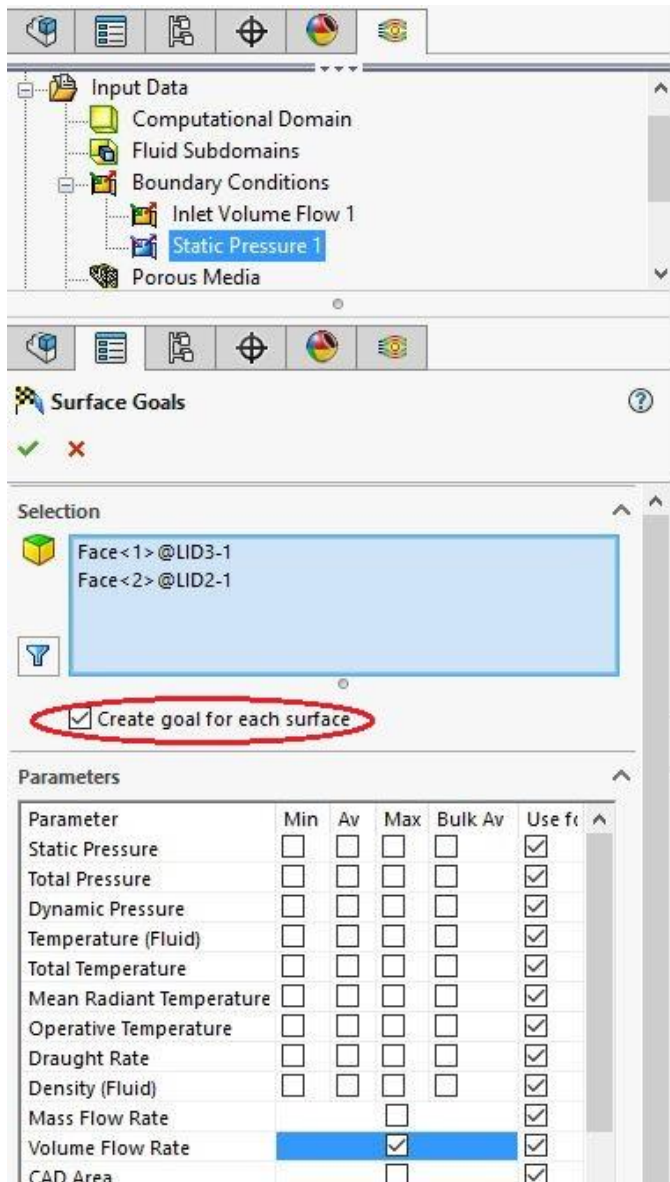
Tavoitteilla määritellään simuloinnin päämäärät. Niiden avulla voidaan esimerkiksi selvittää puhaltimen paineentuottotarve tai paine-ero putkiston kahden poikkileikkauspisteen välillä. Myös lämpötilan ja nopeuden muutoksia seurataan tavoitteiden avulla.

Virtaustekniset yhtälöt ovat erittäin epälineaarisia, joten ongelmia ratkaistaan iteratiivisesti. Tämä vaatii suurta laskentatehoa tietokoneelta. Flow Simulationissa on sisäinen ongelmanratkaisujärjestelmä, mutta asettamalla sopivat tavoitteet, saadaan tuloksista huomattavasti luotettavampia ja simuloinnin ratkaisuvaihe (run) tapahtuu nopeammin, kun ohjelma tietää mihin simuloinnilla pyritään. (Galliera 2015.)

5.3.1 Lähtöjen tilavuusvirrat

Lähtöjen tilavuusvirrat saadaan tavoitteiksi, kun avataan Insert Surface Goals ja valitaan pienempien putkien kansien sisäpinnat. Tämä sama voidaan myös tehdä kuvan 11 osoittamalla tavalla, jolloin klikataan Boundary Conditions alta

Static Pressure 1. Valitaan Volume Flow ja tarvittaessa muita haluttuja parametreja. Valitaan myös kuvassa 11 punaisella ympyröity kohta, jolloin ohjelma tekee automaattisesti tavoitteet kaikille valitsemillesi pinoille ja parametreille.



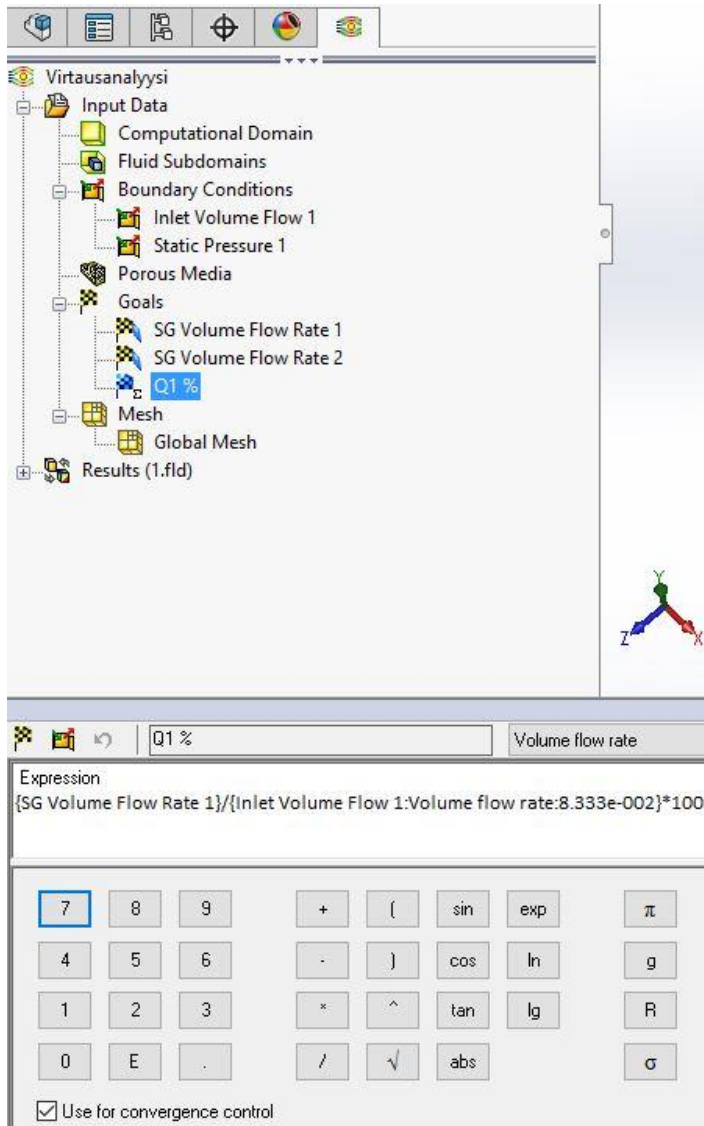
KUVA 11. Surface Goals

5.3.2 Yhtälötavoitteet

Yhtälötavoitteita asetetaan Equation Goal -ikkunan kautta. Niissä käytetään aiemmin valittuja tavoitteita, joista muodostetaan matemaattinen yhtälö. Ne ovat

erittäin hyödyllisiä, sillä niitä voidaan käyttää muun muassa paine-eron selvittämiseen, venttiilin virtauskertoimen ratkaisuun tai pumppujen hyötysuhteen tarkasteluun. (Galliera 2015).

Ohjelma pyrkii ratkaisemaan yhtälöä loputtomiin, joten sen täytyy olla mahdollinen toteuttaa. Esimerkissäni tarkastelen, kuinka paljon prosentuaalisesti tilavuusvirta lähdössä 1 (90° käyrä) on tuloarvosta (kuva 12).



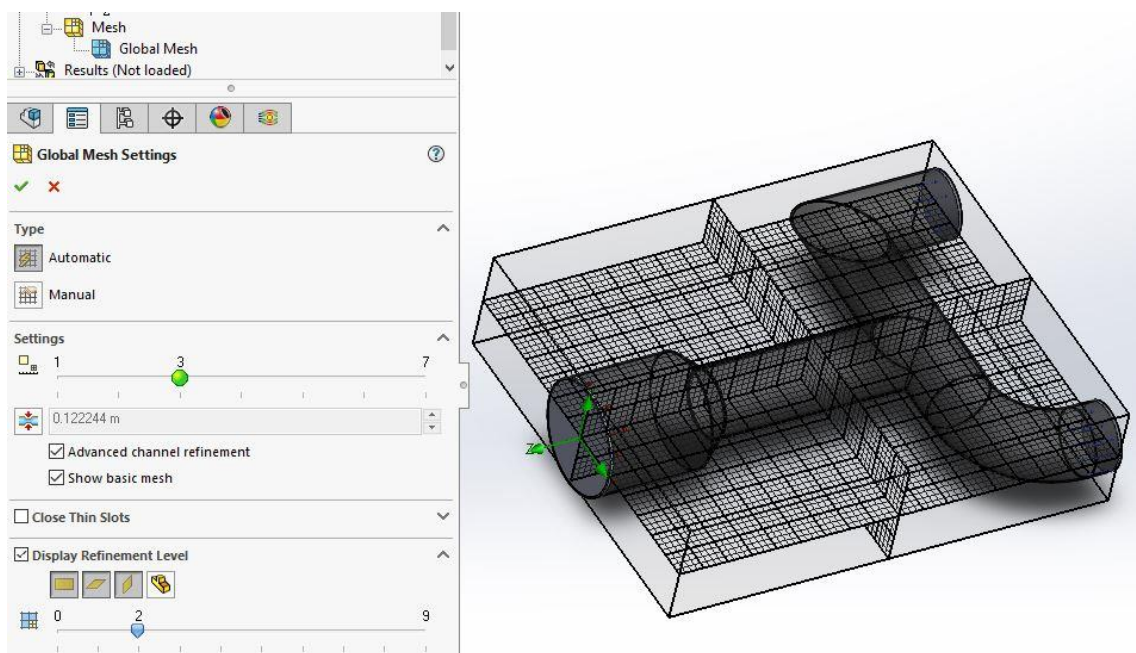
KUVA 12. Equation Goal

5.4 Elementtiverkon tiheys

Flow Simulation antaa vapaat kädet muokata elementtiverkon tiheyttä kokoonpanossa, osissa tai jopa pienissä yksityiskohdissa. Tiheämpi elementtiverkko antaa tarkempia tuloksia, mutta laskenta-aika kasvaa eksponentiaalisesti.

Suurin osa ongelmista ratkeaa riittävän tarkasti elementtiverkon tiheydellä 3, mutta jos simuloitavassa rakenteessa on esimerkiksi paljon pieniä reikiä tai elektroniikan komponentteja, on pohdittava, täytyykö niiden kohdalla verkkoa tihentää. (Zias 2016.)

Kuvassa 13 on asetettu perusverkon tiheydeksi 3 ja tihennysverkko tarkkuuteen 2. Elementtiverkon tiheyttä säädetään Mesh-valikon alta löytyvästä Global Mesh -valikosta.

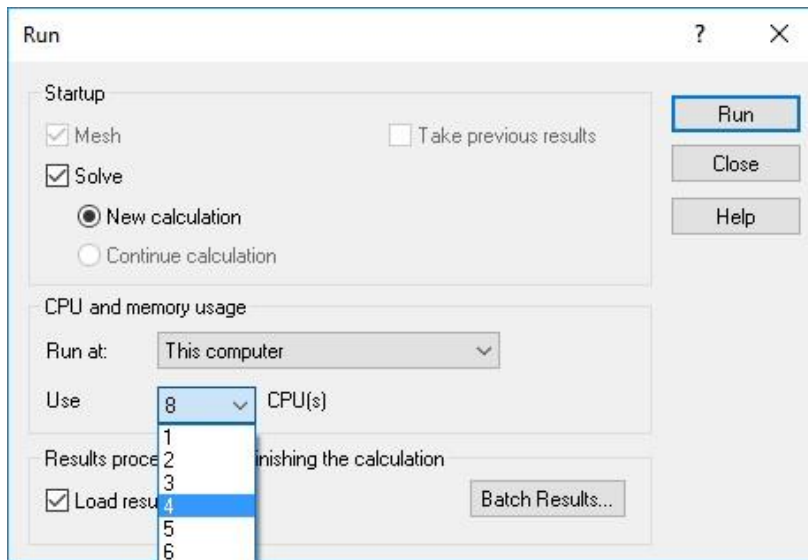


KUVA 13. Elementtiverkon tarkkuus

5.5 Simulaation ratkaiseminen

Yläpaneelistä valitaan Run, jolloin kuvan 14 valikko avautuu. Ratkaisu voi kestää kappaleen geometrian ja valittujen tarkkuusasetusten vuoksi todella kauan, jolloin kannattaa valita käyttöön vähemmän prosessoritehoa, jos on tarpeellista

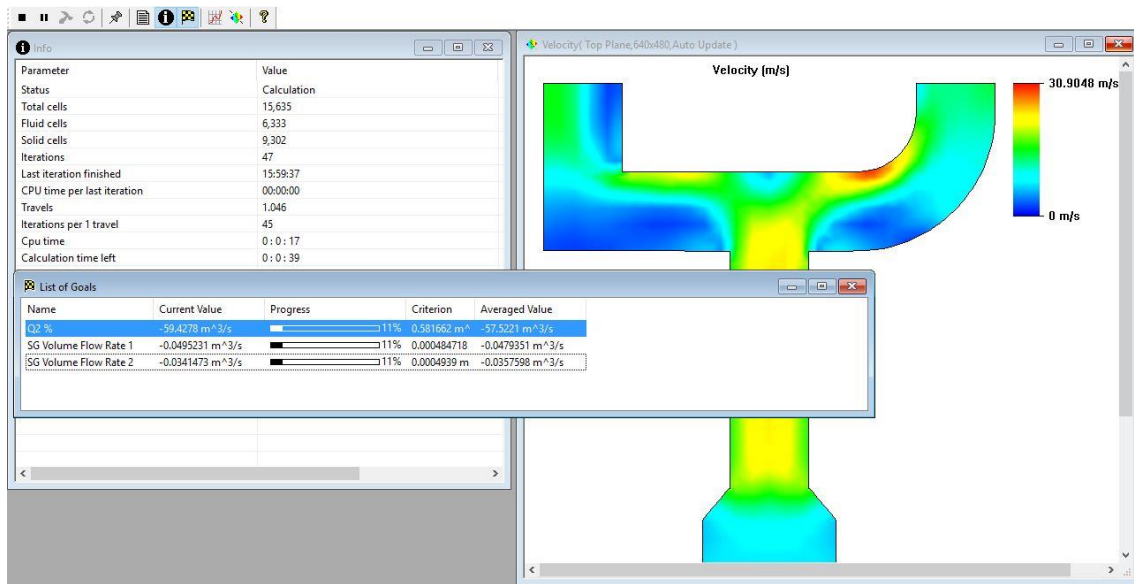
käyttää tietokonetta laskennan aikana. Prosessoritehon käyttöön voi vaikuttaa kuvassa 14 näkyvästä valikosta.



KUVA 14. Run-valikko

Ratkaisun voi keskeyttää ja jatkaa sitä myöhemmin. Lisäksi on mahdollista tallentaa valitut parametrit, jos on tarpeellista kokeilla esimerkiksi erilaisia konfiguraatioita tai nopeasti muokata jotain yksityiskohtaa 3D-mallissa.

Flow Simulation antaa mahdollisuuden seurata ratkaisun kehittymistä usealla tavalla. Monimutkaisten 3D-mallien simuloinnissa on välillä hyvä seurata, onko ohjelma jäänyt jumiin tai näyttävätkö tulokset yhtään järkeviltä. Kuvassa 15 on esitetty muutamia erilaisia ohjelman tarjoamia tapoja seurata ratkaisun edistymistä. Näitä ikkunoita saa auki kuvan 15 ylälaudassa sijaitsevistä valikoista.



KUVA 15. Solver

5.6 Tulokset

Results-välilehden alla on kattava määrä erilaisia työkaluja, joilla tuloksia on helppo analysoida. Kaikkiin mahdollisiin suuntiin voi tehdä visuaalisia leikkauskuvia säätämällä parametreja lukuarvoina tai vetämällä nuolista haluttuun suuntaan. Yksittäisten partikkelien etenemistä 3D-mallissa voi seurata animaatioiden avulla ja ohjelmisto näyttää, mihin syntyvät vaarallisimmat pyörteet. Ohjelma näyttää tuloksia myös pelkästään tekstimuodossa, ja tulokset voidaan siirtää suoraan Exceliin yhdellä hiiren painalluksella.

Mitä lähemmäs haluttua yksityiskohtaa zoomataan, sitä tarkemmin Flow Simulation näyttää virtauksen käyttäytymistä. Tämän ominaisuuden vuoksi mallinnuksen pienimmätkin ongelmakohdat voi nähdä ennen prototyypin valmistusta. Tuloksiin tulee kuitenkin aina suhtautua kriittisesti ja ne tulee todentaa testein tuotteen valmistusvaiheessa.

Cut Plot -työkalulla voi tehdä leikkauskuvantoja ja se näyttää, missä kohdassa kappaletta virtaukseen syntyy pyörteitä. Lisäksi sen avulla huomaa kappaleen ne kohdat, joissa virtausnopeus muuttuu huomattavasti. Sitä voi käyttää myös muiden parametrien tutkimiseen, kuten lähes kaikkia results-työkaluja. Liitteissä 3 ja 4 on esimerkkejä Cut Plot -työkalun käytöstä.

Surface Plot -työkalulla tutkitaan kappaleen pintoja. Se on erinomainen työkalu, jos tarvitsee löytää kappaleesta kohdat, joihin kohdistuu kovaa räsytystä. Liitteessä 5 on esimerkki Surface Plot käytöstä.

Flow Trajectories -työkalulla seurataan animaation avulla partikkeleiden etenemistä kappaleessa tulosta lähtöihin. Animaatio havainnollistaa, kuinka partikkelit jäävät ongelmakohtiin pyörimään, jolloin kappaleen geometriaa on syytä muuttaa. Liitteissä 6 ja 7 on esimerkkikuvia animaation lopusta.

Particle Studies -työkalu antaa mahdollisuuden tutkia partikkelien käyttäytymistä eri materiaalien kanssa. Se ottaa huomioon esimerkiksi pintojen karheuden, joka vaikuttaa siihen, kuinka tutkittava fluidi käyttäytyy osuessaan kappaleen pintaan. Particle Studies -työkalu näyttää sekä animaation, että tekstidataa yksittäisten partikkeleiden etenemisestä kappaleessa.

Point Parameters -työkalulla tutkitaan yksittäisiä pisteitä kappaleessa. Se on hyödyllinen esimerkiksi tilanteessa, jossa kappaleeseen on tarkoitus asettaa anturi mittaamaan jotain suuretta. Liitteessä 8 on valittu neljä tutkittavaa pistettä kappaleesta.

Surface Parameters -työkalulla tarkastellaan pintojen parametreja tekstimuodossa. Saadut tiedot voi siirtää suoraan Exceliin. Työkalulla voi nopeasti tutkia esimerkiksi painehäviötä kappaleessa tai lähtöjen tilavuusvirtoja. Liitteistä 9, 10 ja 11 löytyvät Surface Parameters -tutkimukset tuloaukolle ja molemmille lähdöille.

Volume Parameters (liite 12) näyttää tekstimuodossa koko kappaleen tai yksittäisen osan tilavuudessa tapahtuvat parametrien muutokset. Sillä voi siis nähdä nopeasti minimi- ja maksimi-arvot tutkittavista suureista.

XY Plot (liite 13) kertoo parametrien muutokset kappaleessa halutulla välillä. Kokoonpanoon tulee luonnostella (sketch) viiva tutkittavalle välille ja ohjelma piirtää annetuilla tiedoilla havainnollistavan käyrän, jonka voi siirtää Exceliin. Esimerkissä virtausnopeus kiihtyy huomattavasti supistuksen jälkeen, on hetken aikaa tasainen ja hidastuu seinän tullessa vastaan.

Goal Plot -työkalu näyttää tekstimuodossa luvussa 5.3.2 määriteltyjen tavoitteiden tulokset. Liitteestä 14 käy ilmi, että oikean putken tilavuusvirta on 59,4% tulovirrasta.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä luotiin Excel-pohjainen laskentataulukko ja ohjeistus virtaus-tekniesten laskelmien suorittamiseen Ginolis Oy:n suunnittelijoiden tarpeeseen. Tavoitteena oli selvittää, kuinka erilaiset rakenteelliset ratkaisut, ympäröivät olosuhteet ja puhaltimen tuottama tilavuusvirta vaikuttavat ilman käyttäytymiseen kuivainlaitteistossa. Excel-taulukko on tarkoitettu vain toimeksiantajan sisäiseen käyttöön, kuten suurin osa ohjeistuksestakin. Tämän vuoksi niitä ei voi esitellä julkisen opinnäytetyön yhteydessä.

Projekti aloitettiin perehtymällä virtaustekniikan teoriaan ja miettimällä, kuinka ongelmaa tulee lähestyä, sillä lähtötietoja oli hyvin niukasti. Nopeasti kävi ilmi, ettei käsin laskeminen riitä tarkkoihin vastauksiin järkevissä aikamääreissä, joten päädyttiin ottamaan käyttöön virtausanalyysiohjelmisto. Simulaatitietoja soveltaen laadittiin Excel-taulukko, jolla valitaan sopiva virtausnopeus tutkittavalle näytteelle, kun tiedetään tilavuusvirran ja painehäviön epälineaarinen suhde.

Laskentataulukko ei ota huomioon, miten putkiston rakenteen muuttaminen vaikuttaa painehäviöihin eikä sillä voi todeta, kuinka ilmavirtaus käyttäytyy tilavuuden muuttuessa voimakkaasti. Virtaustekniset yhtälöt ovat erittäin epälineaarisia, joten varmasti toimivan laskentataulukon laatimiseen tarvitaan valtava määrä dataa.

Laskentataulukon toimivuutta ei voitu todeta opinnäytetyön yhteydessä, joten teorian vertaaminen käytäntöön ja taulukon mahdollinen laajentaminen jää tilaajan vastuulle. Laitetta testattiin erilaisilla tuloilmavirroilla, mutta puutteellisten mittalaitteiden vuoksi tulokset ovat epävarmoja. Ohjeistus virtauslaskentaan on erittäin kattava, ja sen avulla on mahdollista toteuttaa virtausteknisesti toimivia ratkaisuja teollisuuden tarpeisiin.

LÄHTEET

A Comparison of CFD Software Packages. 2017. Resolved Analytics. Saatavissa: <https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-popular-cfd-software-packages>. Hakupäivä 10.5.2017.

Ansys. Saatavissa: <http://www.ansys.com>. Hakupäivä 10.5.2017.

Difference Between FEA and CFD. 2016. SimScale. Saatavissa: <https://www.simscale.com/forum/t/difference-between-fea-and-cfd/53035>. Hakupäivä 30.5.2017.

Galliera, Joe 2015. Goals in SOLIDWORKS Flow Simulation. Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Saatavissa: <http://blogs.solidworks.com/solidworks-blog/2015/01/goals-in-solidworks-flow-simulation.html>. Hakupäivä 11.5.2017.

Karinen, Reetta 2016. CHEM-A1110. Virtaustekniikka. Opintojakson luennot keväällä 2016. Espoo: Aalto yliopisto. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/207538/mod_folder/content/0/VR%20Virtaustekniikka.pdf. Hakupäivä 26.4.2017.

Putkivirtaus. 2009. Luentomateriaali. Metropolia ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://wiki.metropolia.fi/display/koneautomaatio/4.+Putkivirtaus>. Hakupäivä 26.4.2017.

Sandberg, Esa – Ripatti, Harri 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Tampere: Tammerprint.

Seppänen, Olli 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Helsinki: Suomen LVI-yhdistysten Liitto.

SOLIDWORKS. Saatavissa: <http://www.solidworks.com>. Hakupäivä 9.5.2017.

Zias, Brian 2016. Equidistant Awesomeness! Meshing with Flow 2016. Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Saatavissa: <http://blogs.solidworks.com/tech/2016/05/equidistant-awesomeness-meshing-with-flow-2016.html>. Hakupäivä 11.5.2017.

LIITTEET

Liite 1 Kanavamateriaalien karheus

Liite 2 Moodyn käyrästä

Liite 3 Cut Plot -nopeus

Liite 4 Cut Plot -paine

Liite 5 Surface Plot -paine

Liite 6 Flow Trajectories -nopeus

Liite 7 Flow Trajectories -paine

Liite 8 Point Parameters

Liite 9 Surface Parameters -vasen puoli

Liite 10 Surface Parameters -oikea puoli

Liite 11 Surface Parameters -tulo

Liite 12 Volume Parameters

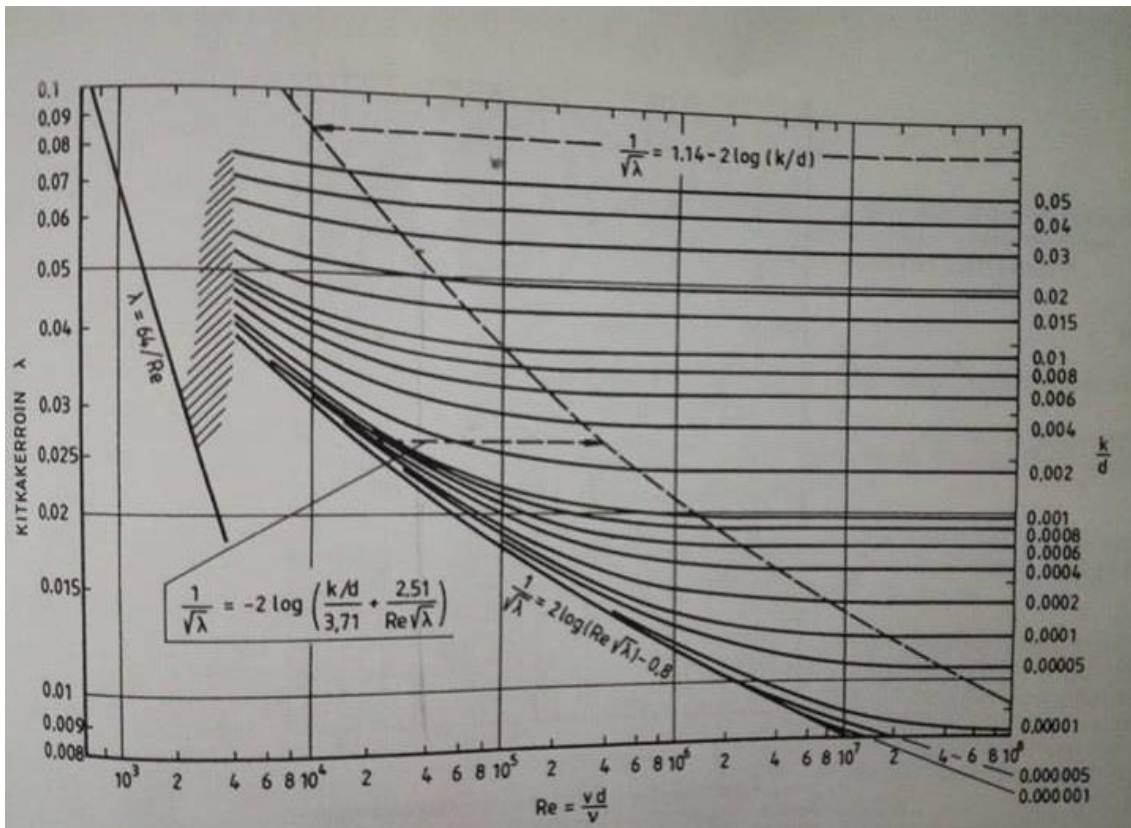
Liite 13 XY Plot

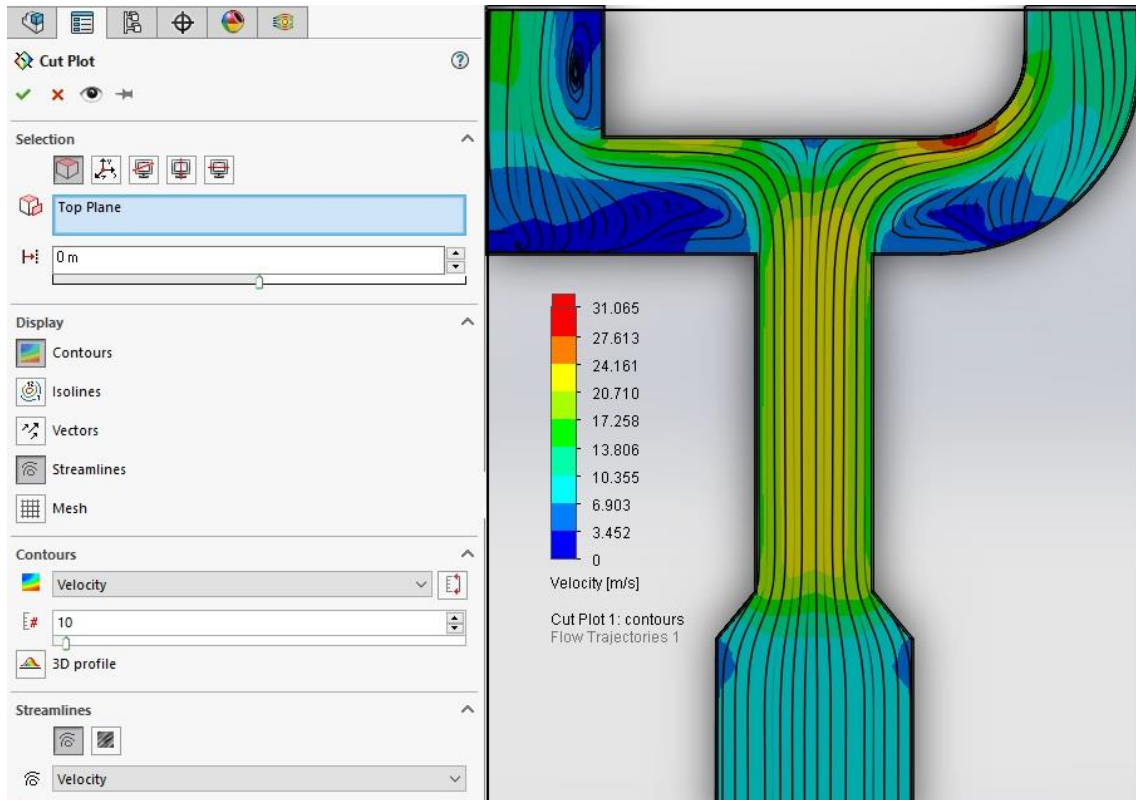
Liite 14 Goal Plot

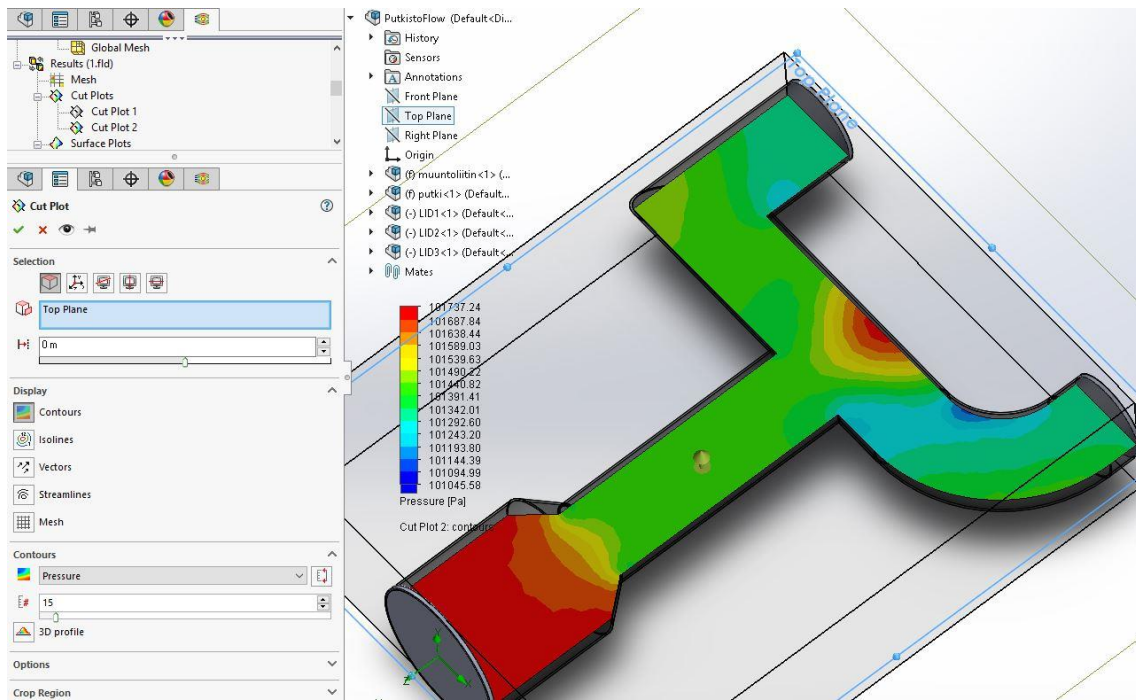
Karinen, Reetta 2016. CHEM-A1110. Virtaustekniikka. Opintojakson luennot keväällä 2016. Espoo: Aalto yliopisto. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/207538/mod_folder/content/0/VR%20Virtaustekniikka.pdf. Haku-päivä 26.4.2017.

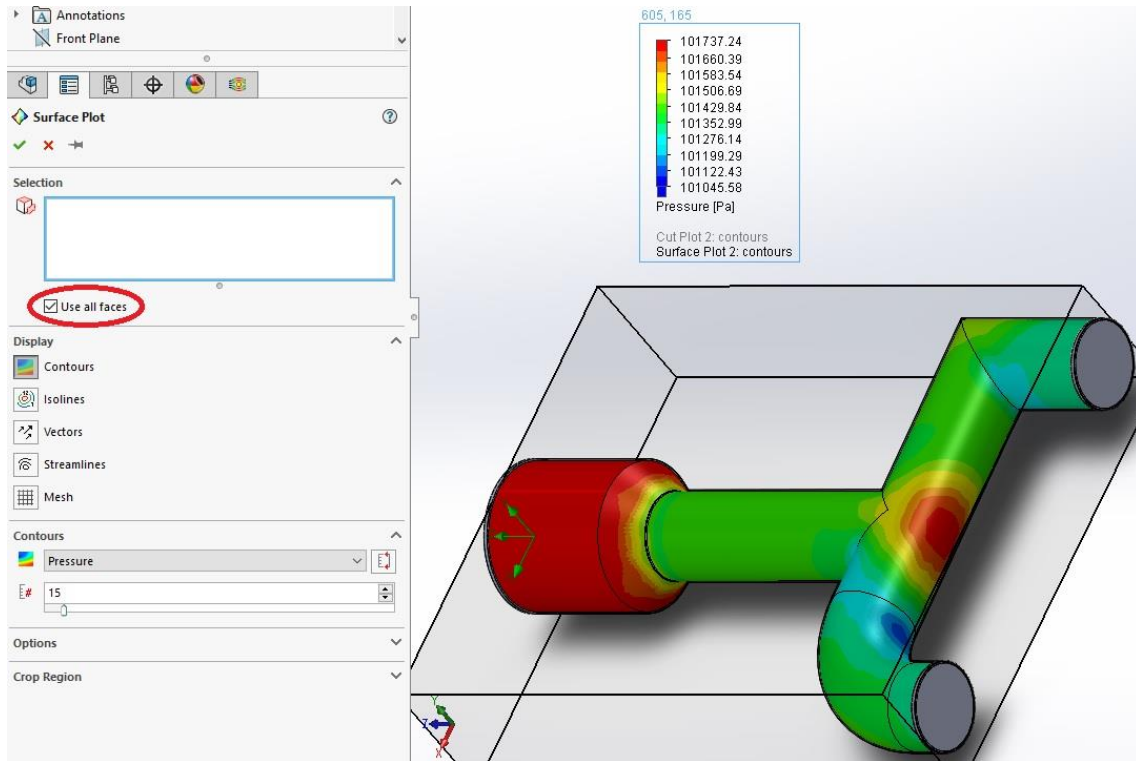
Putkimateriaali		k mm	huom.
	lasi, uusi	0,0013	} teknisesti sileät
	kupari, uusi	0,0013	
	messinki, uusi	0,0013	
	pronssi, uusi	0,0015	
	kevytmetalli	0,0015	
	kumi, uusi	0,0016	
	muovit, uusi	0,0015...0,007	
* saumattu	valssattu, uusi	0,02...0,06	} uudet teräsputket ~ 0,05 mm
	kuumennettu	0,03...0,04	
	sinkitty	0,07...0,1	
* pitkittäishitsattu	valssipinta	0,04...0,1	
	bitumoitu	0,01...0,05	
	galvanoitu	0,008	} kohtalaisesti ruostunut ~ 0,2 mm
	käytetty saumallinen tai saumattu	0,1...0,2	
valurauta	valupinta, uusi	0,2...0,6	} vahvasti ruostunut ~ 1...3 mm
	bitumoitu, uusi	0,1...0,2	
	käytetty	0,5...1,5	
sementti, asbesti	uusi	0,03...0,1	
betoni	hiottu, uusi	0,01...0,2	
	keskikarkea	1...2	
	karkea	2...3	

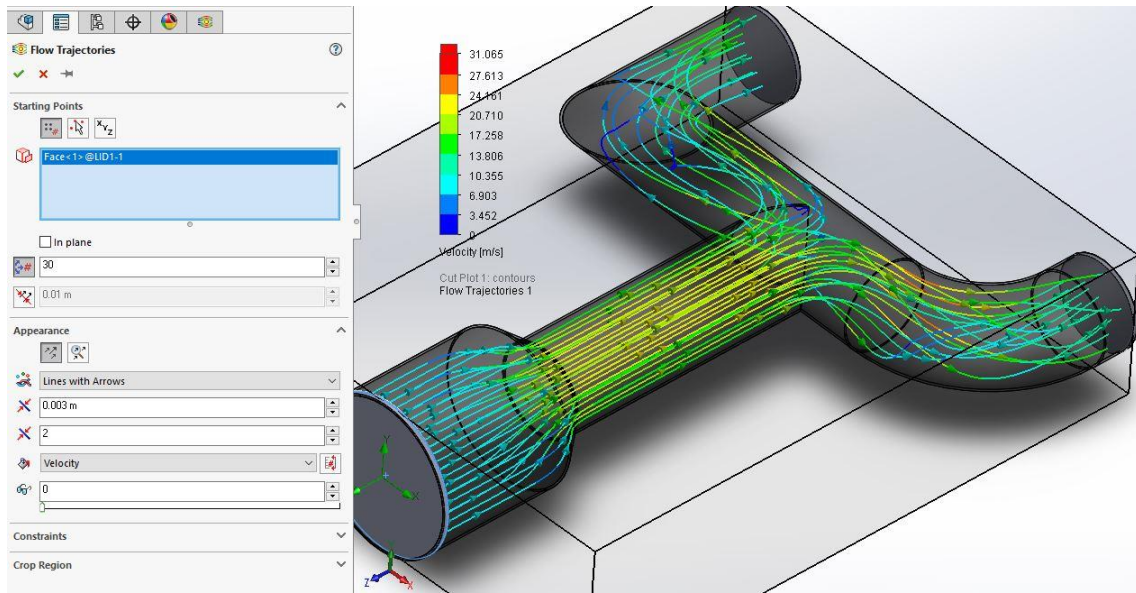
Seppänen, Olli 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Helsinki: Suomen LVI-yhdistysten Liitto.

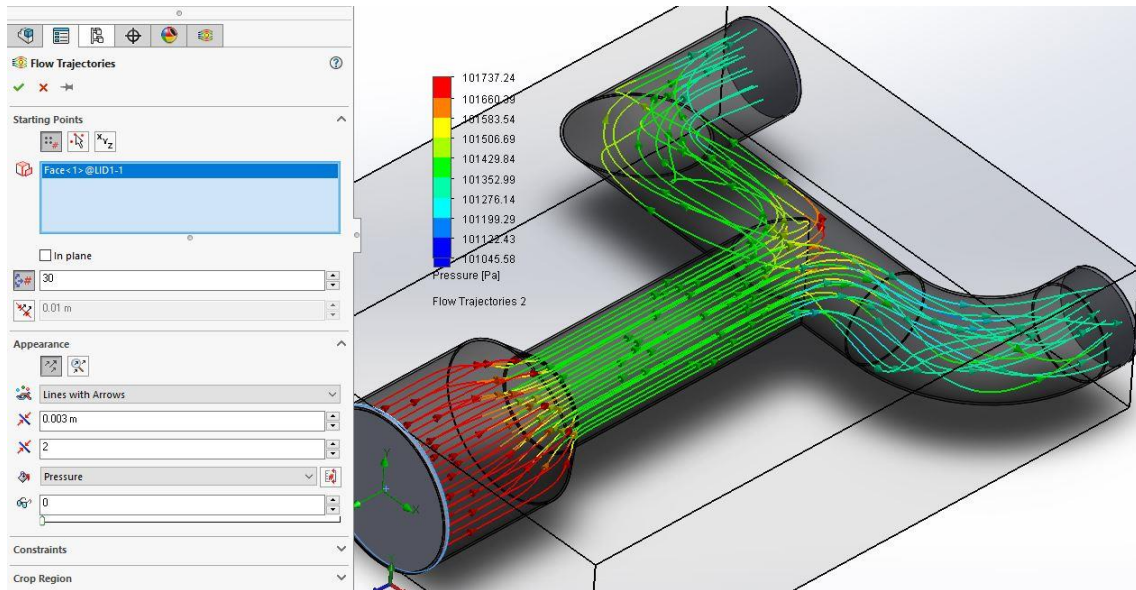












The screenshot displays the 'Point Parameters' dialog box in a CAD or simulation software. The dialog is titled 'Point Parameters' and has a help icon. It shows a list of selected entities: Edge<1> @putki-1, Edge<2> @putki-1, Face<2> @LID2-1, and Face<3> @LID3-1. Below this is a dropdown for the 'Global Coordinate System'. The 'Parameters' section has checkboxes for 'All', 'Density (Fluid)', 'Pressure', 'Temperature (Fluid)', 'Velocity', 'Velocity (X)', 'Velocity (Y)', 'Velocity (Z)', and 'Mach Number'. The 'Options' section contains 'Show' and 'Export to Excel' buttons. To the right is a 3D model of a pipe with three blue circular markers on its surface. At the bottom, a table displays the following data:

X [m]	Y [m]	Z [m]	Medium	Pressure [Pa]	Velocity [m/s]
-0.170	0.004	-0.400	Fluid	101444.49	8.954
0.080	-0.002	-0.400	Fluid	101272.56	5.409
-0.170	0.004	-0.517	Fluid/Solid	101325.00	9.630
0.170	-0.004	-0.517	Fluid/Solid	101325.00	12.273

Surface Parameters

Selection: Face<1> @LID2-1

Use all faces

Parameters:

- All
- Density (Fluid)
- Pressure
- Temperature (Fluid)
- Velocity
- Velocity (X)
- Velocity (Y)
- Velocity (Z)
- Mach Number

Global Coordinate System

More Parameters...

Options: Show

Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Velocity [m/s]	0.451	15.014	8.794	11.766	0.0040
Integral Parameter	Value	X-component	Y-component	Z-component	Surface Area [m ²]
Mass Flow Rate [kg/s]	-0.0411				0.0040
Volume Flow Rate [m ³ /s]	-0.0342				0.0040

Surface Parameters

Selection: Face<1>@LID3-1

Use all faces

Parameters:

- Density (Fluid)
- Mass Flow Rate
- Pressure
- Temperature (Fluid)
- Velocity
- Velocity (X)
- Velocity (Y)
- Velocity (Z)
- Volume Flow Rate

More Parameters...

Options:

Show

Export to Excel

Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Velocity [m/s]	8.509	15.577	12.614	12.759	0.0040

Integral Parameter	Value	X-component	Y-component	Z-component	Surface Area [m ²]
Mass Flow Rate [kg/s]	-0.0596				0.0040
Volume Flow Rate [m ³ /s]	-0.0495				0.0040

Surface Parameters ?

✓ ✗

Selection

Face<1>@LID1-1

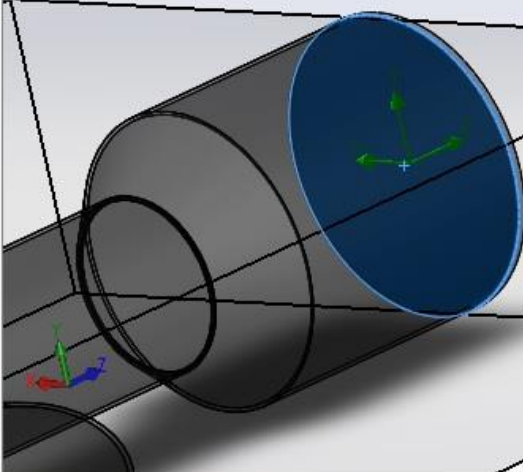
Use all faces

Parameters

- Mass Flow Rate
- Pressure
- Temperature (Fluid)
- Velocity
- Velocity (X)
- Velocity (Y)
- Velocity (Z)
- Volume Flow Rate
- Area (Fluid)

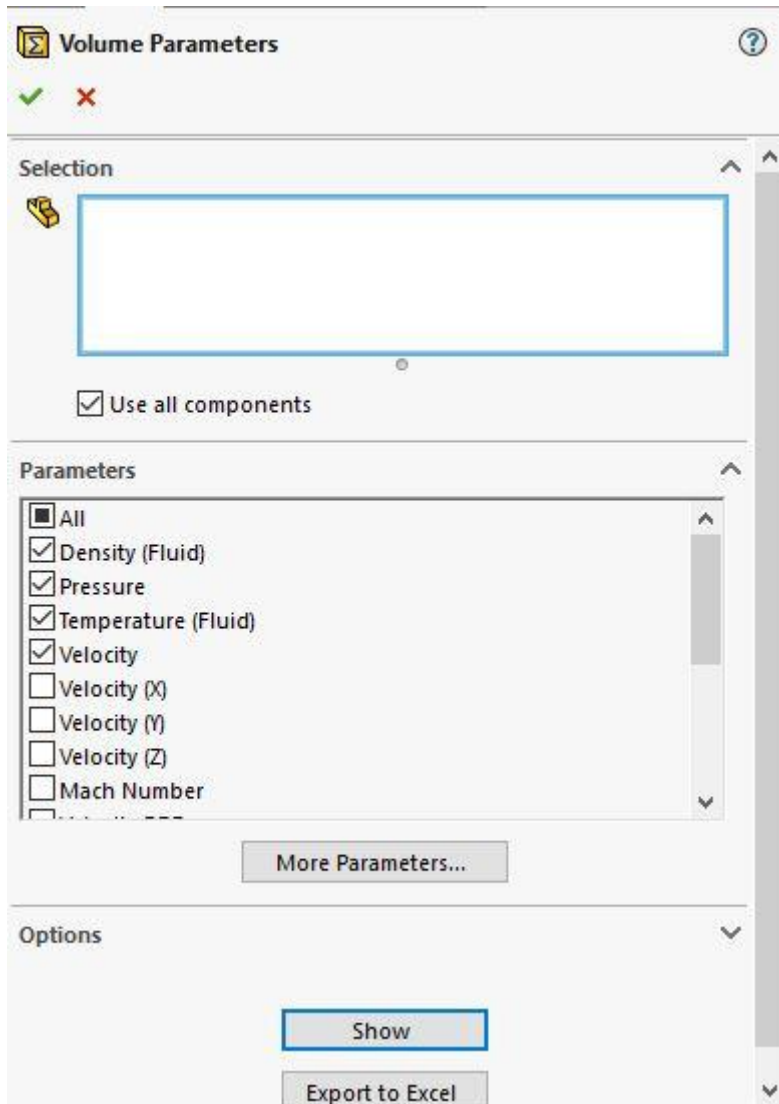
More Parameters...

Options

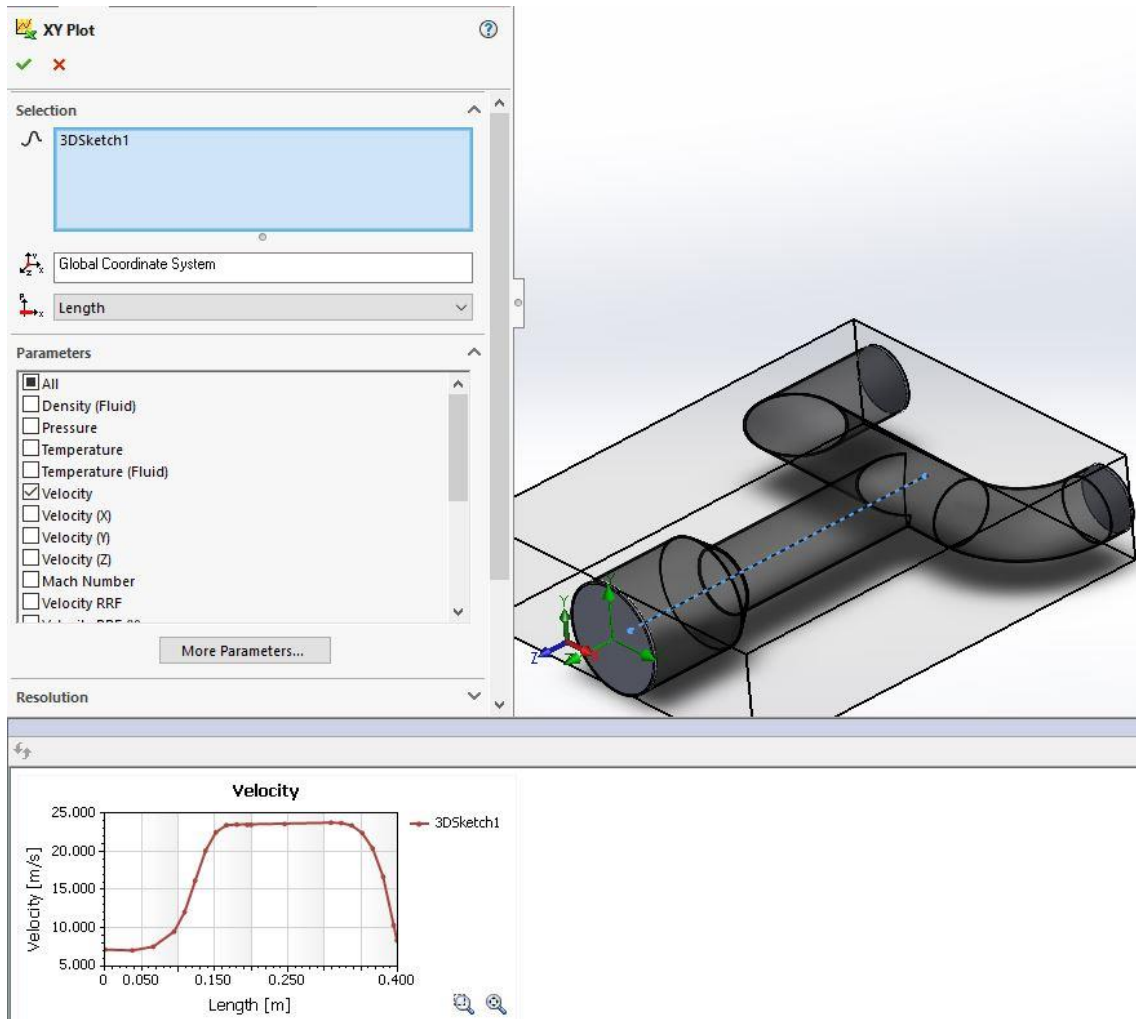


Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Pressure [Pa]	101694.37	101694.51	101694.41	101694.41	0.0116
Velocity [m/s]	7.198	7.198	7.198	7.198	0.0116

Integral Parameter	Value	X-component	Y-component	Z-component	Surface Area [m ²]
Volume Flow Rate [m ³ /s]	0.0834				0.0116



Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Volume [m ³]
Pressure [Pa]	101045.58	101737.24	101484.35	101484.57	0.004616
Density (Fluid) [kg/m ³]	1.20	1.21	1.21	1.21	0.004616
Velocity [m/s]	0.405	31.132	11.980	11.978	0.004616
Temperature (Fluid) [K]	292.74	293.22	293.13	293.13	0.004616
Relative Pressure [Pa]	-279.42	412.24	159.35	159.57	0.004616



Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
SG Volume Flow Rate 1	[m ³ /s]	-0.0495	-0.0495	-0.0496	-0.0492	100	Yes	0.0004	0.0005
SG Volume Flow Rate 2	[m ³ /s]	-0.0342	-0.0342	-0.0345	-0.0341	100	Yes	0.0004	0.0005
Q1 %	[m ³ /s]	-59.3696	-59.3787	-59.4912	-58.9880	100	Yes	0.5032	0.5778