Tampereen yliopisto

Hannes Räme

LASERHITSAUSSUUTTIMEN SUOJA-KAASUN VIRTAUSMALLINNUS

Kandidaatintutkielma
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Hannes Räme: Laserhitsaussuuttimen suojakaasun virtausmallinnus
(Shielding gas flow modeling of laser welding nozzle)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2020

Laserhitsauksessa metalli lämpenee ja altistuu hapettumiselle. Hapettumisen estämiseksi hitsauksessa käytetään suojakaasua. Liian pieni määrä suojakaasua johtaa heikkoon liitokseen, mutta liian suuri määrä on puolestaan taloudellinen menoerä. Sopivan suuttimen suojakaasun määrän ja muodon testaaminen on 3D-tulostettuina prototyyppeinä hidasta. Tässä työssä tarkasteltiin, mitä vaadittaisiin suuttimen CFD-mallinnukseen, mikäli haluttaisiin tutkia tilavuusvirran ja pinnan etäisyyden vaikutusta suojakaasun tilavuusosuuteen.

Työn teoriaosuudessa tutustuttiin virtaukseen liittyviin ilmiöihin, mallinnuksen yksinkertaistuksiin, laskentakaavoihin sekä Comsolin verkkosivujen ohjeistuksiin. Teorian pohjalta pyrittiin luomaan mahdollisimman tarkka sekä laskennallisesti taloudellinen ja stabiili malli. Tämän jälkeen tulokset laskettiin ja esitettiin taulukoidussa muodossa. Lopuksi pohdittiin mallin ja suuttimen parannusehdotuksia.

Tulosten perusteella suutin ei saavuttanut haluttua suojakaasun 90 %:n tilavuusosuutta. Osuuteen ei voitu vaikuttaa merkittävästi 5–35 mm:n etäisyyksillä ja 10–50 l/min syöttönopeuksilla. Tulokset olivat keskimäärin 50–65 % alueella, mutta ajasta riippuvaa vaihtelu oli merkittävää. Vaihtelu lisääntyi etäisyyden kasvaessa ja tilavuusvirran vähentyessä. Tulosten pohjalta vaikuttaakin, että geometria imee suuttimen yläaukosta vakiomäärän ilmaa suhteessa syötettävään suojakaasumäärään. Siksi tulokset eivät juurikaan parantuneet parametreja muuttamalla.

Ongelmana tulosten luotettavuuden suhteen oli turbulenssimallin, numeraalisen tarkkuuden tarkastelun sekä hilakoon tarkastelun puuttuminen. Lisäksi suuttimen geometriaa olisi voinut yksinkertaistaa huomattavasti poistamalla suojakaasun tuloväyliä. Myöskin pyöristyksiä olisi kuulunut käyttää enemmän parempien mallinnustulosten saamiseksi.

Saatujen tulosten perusteella suuttimen suorituskykyä voisi parantaa pyrkimällä estämään ilman imeytymistä suuttimen yläosasta suojakaasuun. Lisäksi suojakaasun jakautuminen oli epätasaista, ja siksi jakajan tulisi hankaloittaa kaasun pääsemistä tuloputkea lähimpien ja vastapäätä oleviin putkiin

Avainsanat: laser beam welding, shielding gas, CFD, COMSOL, the level set method

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. ONGELMAN MÄÄRITTELY 2
3. TEORIA 4
3.1 Hilaverkoston luominen 5
3.2 Virtaus fysikaalisena ilmiönä 7
3.3 Laskennan matemaattinen muoto 9
3.3.1 Navier–Stokes -yhtälöt 9
3.3.2 Dimensiottomat luvut 10
3.3.3 RANS-yhtälöt 11
3.3.4 Level Set -yhtälöt 12
4. PARAMETRIT 13
4.1 Reunaehdot 13
4.2 Verkostointi 14
5. TULOKSET 17
5.1 Tulosten parametrit 17
5.2 Lyhyen aikavälin tarkastelu 18
5.2.1 Etäisyyden vaikutus 18
5.2.2 Tilavuusvirran vaikutus 19
5.3 Pitkän aikavälin tarkastelu 21
5.3.1 Etäisyyden vaikutus 22
5.3.2 Tilavuusvirtauksen vaikutus 22
5.4 Tulosten tarkastelu 22
5.4.1 Virtausjakauma 22
5.4.2 Laskentanopeus 23
5.4.3 Turbulenssimalli 24
6. YHTEENVETO 26
6.1 Tulosten yhteenveto 26
6.2 Mallinnuksen parantamisehdotukset 26
6.3 Suuttimen parantamisehdotukset 27
LÄHTEET 28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAD-malli = Computer aided desaing -ohjelmalla luotu 3D malli
CFD-malli = Computational fluid dynamics -ohjelmalla luotu virtausmalli
FEM = Finite element method, elementtimenetelmä
Hila = Verkoston elementti
Lohko = Pienempiin osiin jaettu CAD geometria
NS = Navier Stokes -yhtälöt
RANS = Ajan suhteen keskiarvotetut NS -yhtälöt
Solmu = Hilan keskikohta, josta lasketaan etäisyys toisiin hiloihin (tarkasta)
TET = Tetraetrinen hila
Viscous sublayer = Viskoosinen kerros
Buffer layer = Puskurikerros
Log-low region = Logaritminen alue
Free-steam flow region = Vapaan virtauksen alue

F = ulkoiset voimat
g = gravitaatiovakio
L = karakteristinen pituus
p = paine
Re = Reynoldsin luku
t = aika
u = nopeus
ϕ = fluidien seossuhde
ζ = elementin kokoon suhteutettu vakio
γ = stabilointiin tarkoitettu parametri
μ = fluidin viskositeetti (Re luvussa, NS -yhtälössä)
∇ = gradientti
ρ = viskositeetti
I = tensori
T = transpooni
k = turbulenssin siirtämä energia
μ_T = turbulenssi kerroin (RANS -yhtälöissä)
ε = energiahukka pyörteissä

1. JOHDANTO

Suojakaasut ovat läpinäkyviä, ja siksi kaasun käyttäytymisen tarkkaileminen on haastavaa. Tästä syystä virtausta mallinnettiin COMSOL-ohjelmiston virtauslaskennalla. Mallinnuksen etuna on tutkimusjärjestelyjen halpa toteutettavuus, sekä nopea mahdollisuus tutkia erilaisia geometrioita ja niiden vaikutuksia virtaukseen. Haasteena mallinnuksessa on luoda mahdollisimman hyvin todellisuutta kuvaava tilanne, sillä Siikosen (2011) mukaan helppokäyttöisten kaupallisten laskentaohjelmien käyttö vaatii paljon ammattitaitoa, jotta osaisi säätää oikeanlaiset asetukset. Tämän työn taustalla ei ole juurikaan kokemusta ja se kannattaa ottaa huomioon tutkimusta arvioidessa.

Laser on koherenttia valoa tuottava laite, joka pystyy siirtämään suuren määrän energiaa pienelle alueelle. Laserhitsauksessa lasersäde kohdistetaan kuumentamaan kahden kappaleen rajapinnalle, jolloin kappaleiden materiaali sulaa ja muodostaa jäähtyessään jatkuvan yhteyden kappaleisiin. (Steen & Mazumber 2010)

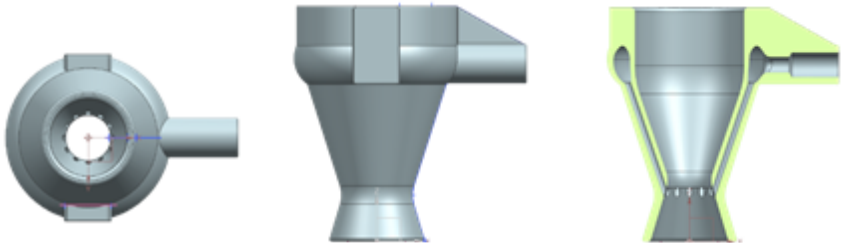
Epäjalot metallit pyrkivät hapettumaan hapekkaissa olosuhteissa muodostaen oksideja. Oksidoituminen puolestaan tekee liitoskohdista hauraampia heikentäen rakenteen kykyä vastustaa rasitusta. (Li et al. 2005) Laserhitsauksessa tämä ilmiö on ongelmallinen, sillä hapettumista tapahtuu sitä nopeammin, mitä kuumemmassa lämpötilassa materiaali pääsee reagoimaan hapen kanssa.

Hapettumista voidaan pyrkiä estämään syöttämällä hitsauksen yhteydessä inerttiä kaasua, jollin metalli ei pääse suoraan kosketukseen hapen kanssa metallin ollessa kuumimmillaan, ja näin vähentää huomattavasti reagointia. Suojakaasua tulee käyttää hitsatessa tarpeeksi, jotta kriittiset alueet peittyvät kaasulla ja liitokset eivät hapetu. Toisaalta suojakaasu on kuluerä ja siten sen käyttö tulisi minimoida kohdentamalla kaasu vain sinne, missä sitä tarvitaan. Tähän tarkoitukseen käytetään suutinta, joka muuttaa virtauksen nopeutta ja jakaa sen tarvittaville alueille. (Kolehmainen 2013, s. 1)

Tässä kandidaatintyössä on tarkoitus tutkia annetun suuttimen virtauksen jakautumista pinnalle. Toisessa luvussa kerrotaan, millä kriteereillä suutinta tutkitaan. Kolmannessa luvussa kuvataan kaasujen virtausta ja vallitsevia yhtälöitä. Neljännessä luvussa työssä käytettäviä parametrejä, viidennessä esitetään tuloksia ja kuudennessa pohditaan parannettavia asioita.

2. ONGELMAN MÄÄRITTELY

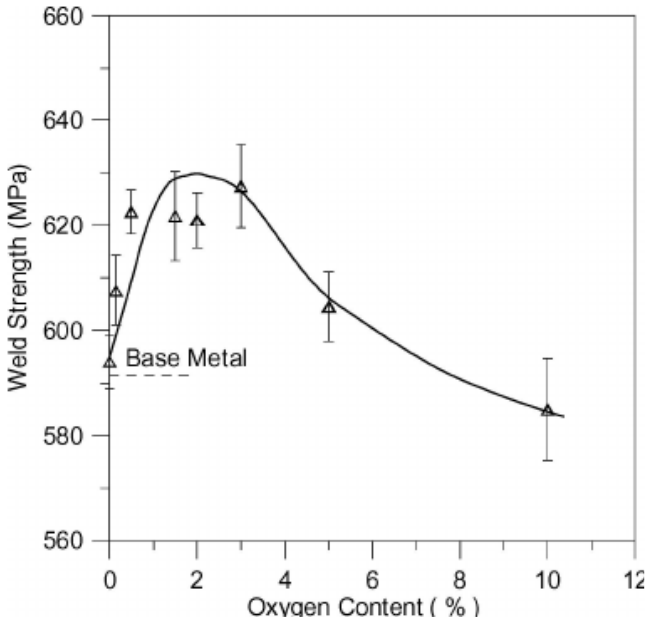
Tässä työssä tarkoituksena on tutkia kuvassa 1 olevan suuttimen kaasuvirtauksen käyttäytymistä eri nopeuksilla ja etäisyyksillä hitsattavasta pinnasta. Hitsauslaite on tarkoitettu 3 ulotteisille pinnoille, mutta tässä tutkimuksessa on pidättäydytty tasaisissa pinnoissa, joita kuvataan lieriöillä. Lieriöiden korkeus kuvastaa etäisyyttä hitsauspinnasta. Eri syöttönopeuksia sai helposti muuttamalla käyttöjärjestelmän *inlet*-arvoa mallinnuksessa.



Kuva 1. *Suuttimen geometria*

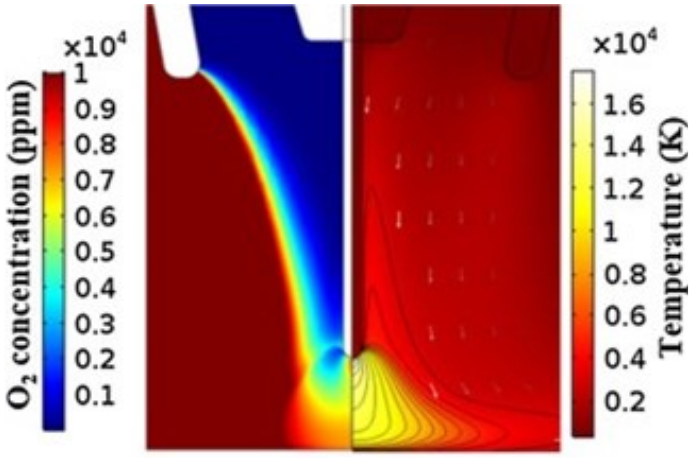
Suuttimen yhtenä kriteerinä oli luoda mahdollisimman tasainen suojakerros 20 mm:n etäisyydelle. Tässä tutkimuksessa mallinnettiin suojakaasun nopeuden ja tilavuusosuuden jakautumista tasolle virratessa. Mallintaessa huomattiin yhden suurimmista tekijöistä olevan yläosasta tuleva ilmamassa, jonka suojakaasun virtaus imee mukanaan.

Toisena kriteerinä oli saada hitsattavalle pinnalle riittävä suojakaasukerros. Kuten kuvan 2 käytännön tutkimuksen tulokset osoittavat, ettei suojakaasun tarvitse poistaa kaikkea happea. On jopa suotavaa, että hitsatessa kaasumassasta on hitsaussauman pinnalla 0,2–2 % happea tilavuudesta (Li et al. 2005). Tähän johtopäätökseen ovat tulleet myös Hidetoshi et al. (2008) tutkiessaan Marangoni-efektiä hitsauksessa. Ilmassa on kuitenkin happea noin 21 % tilavuudesta. Näistä syistä suuttimen tavoitteena on virtaus, joka sisältää 1–10 % tilavuudesta ilmaa ja loput puhdasta suojakaasua eli typpeä.



Kuva 2. *Liitoksen vetolujuus suhteessa suojakaasun hapen määrään. (Li et al. 2005)*

Oikeassa laserhitsauksessa teräs kuumenee sulattamisessa siirtäen lämpöä ympäristöön, jolloin myös materiaalien ominaisuudet muuttuvat. Raudan sulamispiste on 1 530 °C ja teräksen hieman matalampi seoksen mukaan (Teräsrakenneyhdistys). Virtauksen takia lämpötila kuitenkin pienenee nopeasti. Kuvassa 3 on mallinnettu numeraalisesti erään laserleikkauksen lämpöjakaumaa, jonka pohjalta mallinnukseen on valittu tasainen 300 °C lämpötila.



Kuva 3. *Oikealla puolella on Bitharasin et al. (2018) numeraalisesti mallinnetun suuttimen lämpötilajakauma. Kuvan alapuolelta on poistettu turha tilasto alkuperäisestä kuvasta.*

Tässä työssä on tarkoitus tutkia suojakaasun virtausta ja moni virtaukseen vaikuttava ilmiö on jätetty huomiotta. Tällaisia tekijöitä ovat muun muassa käytetyn laserin teho ja asetukset, hitsausnopeus sekä lämmöstä johtuva konvektio. Myös numeraaliseen mallintamiseen liittyy virheitä, ja niitä käydään läpi teoriaosuudessa.

3. TEORIA

Ratkaisumenetelmänä työssä käytetään COMSOL-ohjelmiston computer aided desing -laskentaa (CAD), tarkemmin *two-phase flow, level set 1* -menetelmää. Menetelmä ratkaisee numeraalisesti tutkittavan geometriaan luodussa hilaverkostossa luvussa 3.3 esitettäviä differentiaaliyhtälöitä alkuarvojen avulla. (Comsol Oy, 2017b) Monimutkaisia muotoja tutkittaessa CFD-laskenta voi olla hyvin raskasta ja aikaa vievää (Ferziger & Perić, 1997 s. 23). Tässä työssä laskemiseen meni minuuteista tunteihin riippuen laskennan asetuksista. Toinen laskentaa hankaloittava tekijä on vakaus. Vakaudella tarkoitetaan annettujen yhtälöiden ja alkuarvojen kykyä konvergoitua eli lähestyä iteroinnissa jotain lukua. (Ferziger & Perić, 1997 s. 32)

Ferzigerin (1997, s. 24) mukaan virtausmallinnus eli computational fluid dynamics -laskenta (CFD) ei ole täydellistä, vaan siihen liittyy aina kolmea erityyppistä virhettä:

- mallinnusvirhe (engl. modelling errors), joka johtuu matemaattisten mallien ja aidon virtauksen eroista
- diskretisointivirhe (engl. discretizatin errors), joka johtuu matemaattisen mallin tarkan ratkaisun ja ratkaistavan algebrallisen systeemin eroista
- konvergoitumisvirhe (engl. convergence errors), joka johtuu algebrallisten systeemien tarkan ratkaisun ja iteroitujen yhtälöiden erosta.

Jotta saataisiin mahdollisimman hyvin todellisuutta kuvaavia ratkaisuja, tulisi käyttää monia yhtälöitä kuvaamaan monimutkaista ilmiötä, lyhyttä tarkasteluaskelta numeraalisessa menetelmässä ja moninkertaisia iterointeja yksittäisen tuloksen tarkkuuden varmistamiseksi (Ferziger & Perić 1997, s. 24). Kuitenkin, kuten aiemmin todettiin, CFD-laskenta vaatii suuren määrän laskentatehoa, ja siksi tässä työssä on jätetty turbulenttimalli huomiotta ja käytetty suuria toleranssirajoja iteroidessa. Tästä syystä tämän työn tarkkuus on matala ja siten vain suuntaa antava.

Laskentatehoa voidaan parantaa tekemällä järkevästi luotu hilaverkko, jolloin iteroitavuus ja tarvittava hilakoko suurenee (Frei 2015). Näiden hilaverkkojen luomiseen on käytettynä COMSOLin verkkosivuilta Frein blogin ohjeita ja niistä kerrotaan enemmän seuraavassa luvussa.

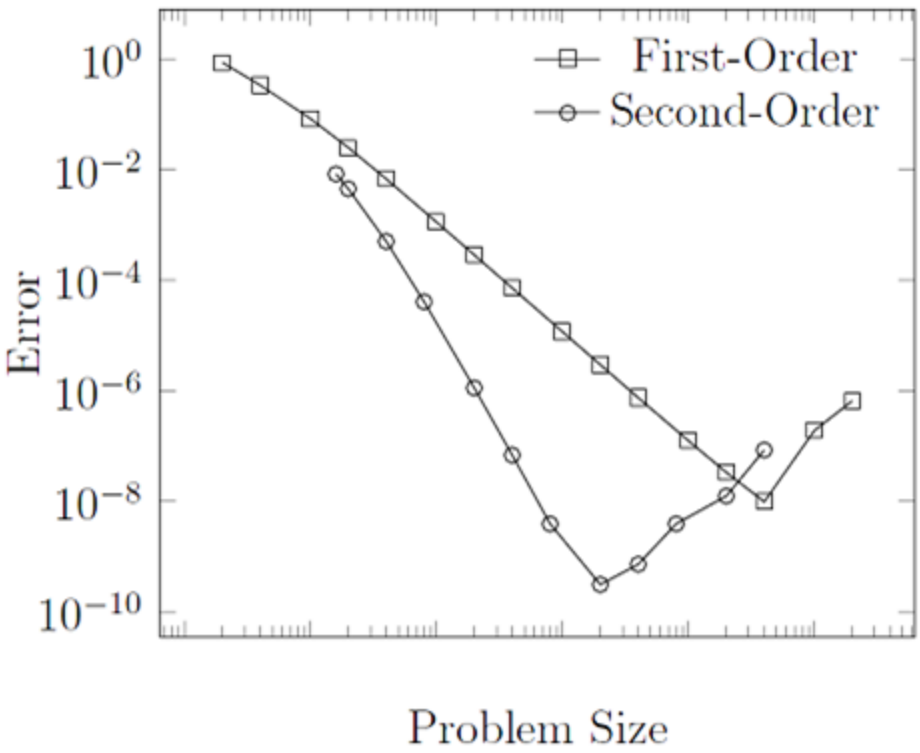
3.1 Hilaverkoston luominen

Virtausmallinnuksessa on käytetty finite element mesh-tekniikkaa (FEM), jonka tarkoitus on jakaa CAD-mallinnuksella tehdyt muodot pienemmiksi geometrioiksi. Näiden muotojen keskikohtia kutsutaan solmuiksi, joita käytetään tarkastelukohtina numeraalisessa laskennassa. Tämän takia kappaleessa on käytetty paljon *Free tetrahedral mesh* -työkalua (TET), joka jakoi hankalan muotoiset alueet vaihtelevan kokoisiksi teatraalisiksi kuvaten hyvin suuttimen muotoja. (Frei 2013)

Tässä työssä käytettiin *block*-paloja suuttimen putkimaisilla alueilla sekä suuttimen ja tarkasteltavan tason välillä. Muuten työssä käytettiin *TET*-verkostoa monimutkaisen geometrian vuoksi.

Hyvä yleispätevä sääntö hilaverkostoa luotaessa on käyttää sitä tiheämpää verkostoa, mitä nopeampaa muutos alueella on (Frei 2017a). Kuitenkin *level set* -menetelmää käytettäessä hilakoot kannattaa pitää samansuuruisina (COMSOL verkkosivu) ja siksi sekoittuvilla alueilla hilakoko on pidetty kauttaaltaan pienenä.

COMSOL-ohjelma muodostaa hilan geometrian yleensä 2. asteen yhtälöillä. Tässä työssä kuitenkin mallinnetaan fluidien virtausta, jossa vallitsee konvektio, joka on yleisesti parempi laskea ensimmäisen asteen kappaleilla. (Frei 2013)

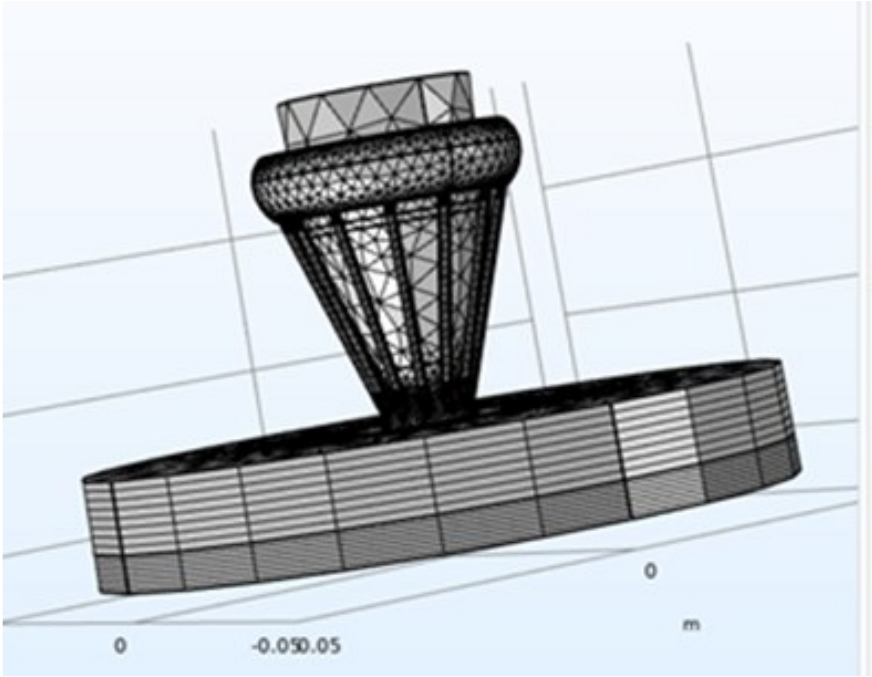


Kuva 4. *Geometrian jatkuvuuden virhe 90° kulmassa suhteessa käännöksessä oleviin elementteihin (Frei 2013).*

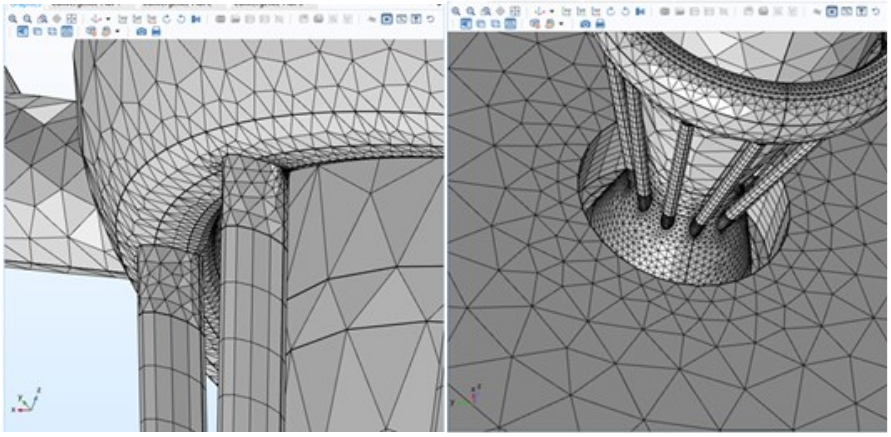
Tämä on hyvä tietää, sillä hilojen määrä vaikuttaa virheen suuruuteen virtauksen suunnan muuttuessa, kuten kuvasta 4 nähdään. Frein mukaan laskennassa olisi hyvä päästä alle 0,1% virheeseen epäjatkuvuudessa. Täten voidaan pitää hyvänä nyrkkisääntönä asettaa 90° kulmassa vähintään kaksi 2. asteen hilaa tai kahdeksan 1. asteen hilaa. (Frei 2013) Tähän nyrkkisääntöön pyrittiin tässä työssä, mikä näkyy suuttimen ja hitsauspinnan välillä.

Lisäksi geometriasta on pyritty poistamaan alueet, jotka eivät vaikuta lopputulokseen, mutta kuluttavat turhan paljon laskentatehoa. Näitä alueita olivat suuttimen yläpään pyöristys, sekä suuttimen letkun sisääntulon pyöristy. Näiltä alueilta poistettiin materiaalia pyöristysten verran pois.

Hilaverkon yleiskuva on esitetty kuvassa 5 ja erityisalueita kuvissa 6a ja 6b. Verkotusta käydään yksityiskohtaisemmin läpi luvussa 4.2.



Kuva 5. *Laskennassa käytetyn hilaverkoston yleiskuva.*

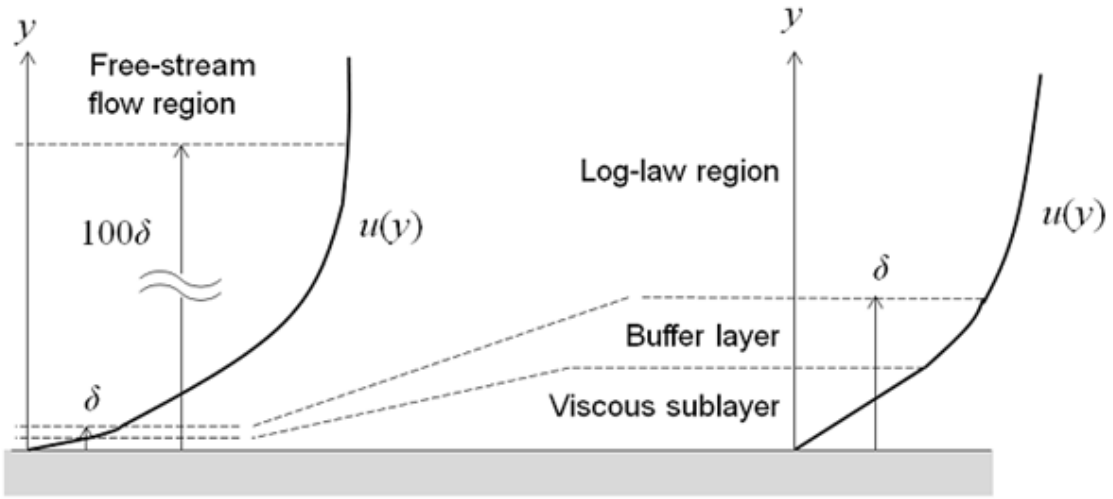


Kuva 6. *a) Tiheää verkostoa käytetty yksityiskohtaisessa alueessa, josta alkaa sweep-komennolla luotu verkosto putkiin, jossa virtauksen muutos on vähäisempää. b) Alue, jossa kaasut sekoittuvat voimakkaasti. Siksi alueella on tasainen hilakoko.*

3.2 Virtaus fysikaalisena ilmiönä

Fluidien, kuten kaasujen, turbulentti virtaus on monimutkainen tapahtuma, johon liittyy monia fysikaalisia ilmiöitä. Tästä syystä virtausten todenmukainen mallintaminen on hyvin haastavaa, ja siksi yksinkertaistuksien tekeminen on välttämätöntä (Ferziger & Perić, 1997, s. 253-255). Kuvan 7 kautta voidaan tutustua virtauksessa tapahtuviin ilmiöihin ja niiden vaikutuksiin mallinnukseen.

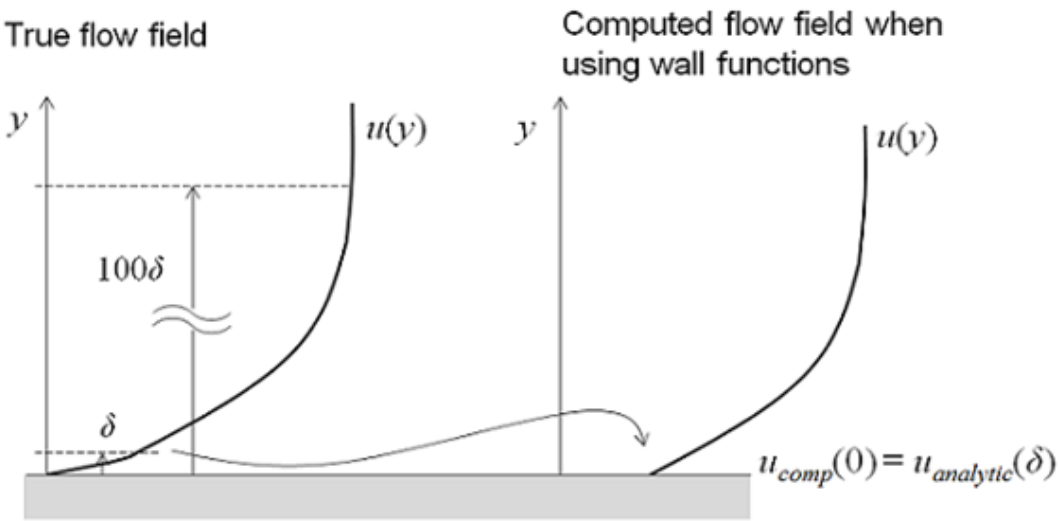
Kuten kuvasta 7 voidaan nähdä, virtausalueet voidaan jakaa 4 eri alueeseen: lähimpänä seinää on viskoosinen kerros (engl. viscous sublayer), jossa fluidin nopeus on suoraan verrannollinen etäisyydestä seinään. Kolmantena alueena on logaritminen alue (engl. log-low region), jossa virtausnopeus on logaritmisesti verrannollinen etäisyyteen seinästä. Näiden kahden kerroksen väliin jää puskurialue (engl. buffer layer), jossa ei vallitse kumpikaan edellisistä, vaan nopeus on laskettavana näiden sekoituksena. Viimeisimpänä alueena on vapaan virtauksen alue (engl. free-steam flow region), jossa virtauksen nopeus ei ole verrannollinen etäisyyteen seinästä.



Kuva 7. *Fluidin virtausnopeus suhteessa etäisyyteen seinästä (Comsol Oy 2017b).*

Virtausmallinnuksessa näihin alueisiin jakaminen olisi laskentatehoa vievää. COMSOLilla on kaksi menetelmää yksinkertaistaa ongelma: monimutkainen nopeusjakauma korvataan analyyttisellä funktiolla, joka nopeuttaa ratkaista. Tätä menetelmää kutsutaan *wall functioksi* ja se toimii myös harvemmilla hilaverkoilla. Kuvassa 8 on oikealla kuvattuna esimerkki korvattavasta analyyttisesta funktiosta. Toinen menetelmä on *low Reynolds number formalitation,* jossa lasketaan raja laminaarisen ja turbulentin virtauksen välille ja sen perusteella poistetaan laskuyhtälöistä vähemmän vaikuttava termi. (Comsol

Oy 2017b)



Kuva 8. *Aidon virtauksen muuttaminen helpommaksi analyyttiseksi funktioksi (Comsol Oy 2017b)*

Vakauden ja laskentatehon säästämisen vuoksi tässä työssä ei käytetty turbulenssimalleja, joten laskentamalli olettaa kaikki virtausalueet viskoosiseksi kerrokseksi. Tämän seurauksena on mahdollista, että suuttimen alapäässä, jossa eri aineiden virtaukset sekoittuvat, voi mallinnettu virtaus poiketa paljon todellisesta virtauksesta.

3.3 Laskennan matemaattinen muoto

Ymmärtääkseen mallinnusta ja siihen liittyviä ongelmia, on ensin ymmärrettävä fluidien virtaamiseen liittyvää fysiikkaa ja laskentaa. Fluidien virtauksen laskentaan ei olla löydetty analyyttistä ratkaisua ja siksi mallintaminen joudutaan lähes poikkeuksetta tekemään numeraalisesti tai aikaisempien tutkimusten pohjalta (Ferzinger & Perić 1997, s. 12). Tutkimuksen suutin on geometriseltä muodoltaan hyvin monimutkainen, joten numeraalinen mallinnus on paras tapa tutkia ongelmaa. Seuraavissa luvuissa tutkitaan vallitsevia yhtälöitä, joista 3.3.1 ja 3.3.5 ovat tärkeimpiä.

3.3.1 Navier–Stokes -yhtälöt

Newtonin 2. laista on johdettu fluideille Navier–Stokes -yhtälö (NS-yhtälö), jossa yhdistyy tasapainotilat. Yhtälö on muotoa

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u\right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{3}{2}\mu(\nabla \cdot u)I\right) + F + \rho g, \quad (1)$$

jossa ρ kuvaa fluidin tiheyttä, ∇ vektorimuotoista osittaisdiffrentiaalia, μ virtauksen dynaamista kitkakerrointa, u on virtauksen nopeusvektoria, p on paine, F on ulkoisten voimien vektori, I on tensori ja T on transpooni. Yhtälön vasemman puolen termi kuvaa virtauksen sisäisten voimien muutosta. Sisäisten voimien muutos on yhtä suuri yhtälön oikean puolen kanssa, jonka ensimmäinen termi sisältää paineen muutoksen fluidissa, toinen termi viskoosisten voimien muutos fluidissa, kolmas termi ulkoisten voimien summaan ja neljäs termi painovoiman vaikutuksen kaasuun. (Ferziger & Perić 1996, s. 5–9; Comsol Oy 2017b)

Yhtälön ratkaisemiseksi tulee myös olettaa massan ja momentin säilyvän, ja siksi on käytettävä myös seuraavaa yhtälöä

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0, \quad (2)$$

jossa t on aika. Näillä yhtälöillä olisi mahdollista ratkaista virtauksia, mikäli ratkaistavalle geometrialle annettaisiin reunaehtoina sisääntulot, ulostulot ja seinät. (Ferziger & Perić 1997 s. 4; Comsol Oy 2017b) Nämä reunaehdot sisältävät yksinkertaisuksia, kuten sisääntulon olevan täysin kehittynyt virtaus, seinillä fluidin nopeuden olevan nolla sekä ulostulon paineen olevan normaali-ilmanpaineen verran. Näihin oletuksiin voidaan tehdä muutoksia, mutta niitä ei ole vaihdettu oletusarvoista tässä työssä.

3.3.2 Dimensiottomat luvut

Yhtälöiden yksinkertaistamiseksi käytetään dimensiottomia lukuja, kuten Reynoldsin lukua ja Machin lukua. Reynoldsin luku kuvaa sisäisten voimien suhdetta viskoosisiin voimiin. Käytännössä tämä kertoo, kuinka pyörteistä virtaus on ja sen perusteella on mahdollista tehdä yksinkertaistuksia poistamalla yhtälöstä sisäisten tai viskoosisten voimien termi. Tämä luku voidaan laskea yksinkertaisesti kaavasta:

$$Re = \rho U L \,/\, \mu, \quad (3)$$

jossa L on karakteristinen pituus tarkasteltavalle alueelle. (Comsol Oy, 2017)

Machin luku puolestaan suhteuttaa fluidin nopeuden fluidissa kulkevan äänen nopeuteen. Tämän luvun avulla voidaan arvioida fluidin puristuvuutta. Puristuvuutta kuitenkin ilmenee suurilla virtausnopeuksilla ja siksi alle 0.3 machin luvun virtauksilla ilmiö kannattaa jättää rajoitetun laskentatehon takia huomiotta. (Ferziger & Perić, 1997, s. 12)

Puristumattomalle fluidile pidettävä 0.3 Mach luvun raja vastaa 20 °C ilmassa 103 m/s nopeutta. Tässä työssä virtausnopeudet ovat paljon pienemiä ja siksi NS-yhtälöissä voidaan olettaa puristumattomiksi, jolloin virtauksen nopeudet pysyvät vakiona

$$\nabla u = 0. \tag{4}$$

Tämän seurauksena laminaarisista voimista voidaan poistaa kokonaan termi:

$$-\frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I, \tag{5}$$

jolloin yhtälö yksinkertaistuu nopeammin laskettavaan muotoon.

3.3.3 RANS-yhtälöt

Aiemmin esitetyillä kaavoilla on mahdollista mallintaa virtausta, mutta todellisempien tulosten saamiseksi tulisi käyttää hyvin tiheää verkostoa, joka kykenisi kuvaamaan virtauksen sisäisiä pyörteitä. Tämä puolestaan kuluttaisi suuren määrän laskentatehoa. Siksi on parempi tehdä lisää yksinkertaistuksia. Tästä syystä turbulenttisen virtauksen mallinnuksessa on fiksumpaa käyttää Reynolds-averaged Navier–Stokes -yhtälöitä (RANS-yhtälö), jotka ovat NS-yhtälöiden muunnoksia, missä nopeus- ja painealueet ovat keskiarvotettuja ajan suhteen. Näin ollen simuloitaviksi yhtälöiksi saadaan

$$\rho(U \cdot \nabla U) + \nabla \cdot (\mu_T(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3}\mu_T(\nabla \cdot U)I = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot U)I\right) + F + \rho g, \tag{6}$$

jossa U on ajan suhteen keskiarvotettua nopeus ja P puolestaan ajan suhteen keskiarvotettu paine. Comsolin verkkosivujen (2017) mukaan k-ε –malli on yleisin teollisuudessa käytetty menetelmä vakauden ja vähäisen laskentakapasiteetin vuoksi. Tämä malli tarvitsee ratkaistakseen kaksi yhtälöä lisää, joissa ratkaistaan turbulenssin siirtämä energia k ja pyörteeseen kuluva energiahäviö ε. Yhtälöiden lisääminen kuitenkin lisää tarvittavaa laskentatehon tarvetta ja tekee laskennasta epävakaampaa. Tästä syystä turbulenssimalli on jätetty pois suuttimen mallinnuksessa.

Kokonaisuutena kyseisen työn virtausmallinnuksessa oletetaan massan ja momentin säilyvän, fluidin olevan puristumaton sekä virtaus oletettiin laminaariseksi, vaikka virtaus on selkeästi turbulenttista. Esimerkiksi putkistossa turbulenttisuuden rajana ilmalle pidetään yli 4000 Re arvoa. Tähän riittää 5mm halkaisijaltaan olevalla putkistolla, 11,6 m/s, mikäli ilman viskositeetiksi oletetaan 17,4e-6 Pa·s ja tiheydeksi 1,2 kg/m^3.

3.3.4 Level Set -yhtälöt

Monifaasimalli on malli, jossa kaksi eri ainetta tai kappaletta vaikuttavat toisiinsa virratessa. Tällaisen ongelmien ratkaisemiseen on monia eri menetelmiä erilaisiin tarkoituksiin. Tässä mallinnuksessa valittiin level set -menetelmä, sillä se on tarkoitettu kahden vain konvertoitumalla ja diffuusiottomalla reagoivan fluidin tutkimiseen. (COMSOL verkkosivut)

Level set -yhtälöt ovat laskennan kannalta ongelmallisia ja niiden käyttöä suositellaan välttämään heikon konvergoitumisen ja hitaan laskennan vuoksi. Lisäksi nämä yhtälöt antavat helposti huonoja tuloksia jyrkissä kulmissa, sekä alueilla, joissa hilakoko muuttuu paljon. (COMSOL nettisivut) Mallinnettavassa kappaleessa oli paljon jyrkkiä kulmia, sekä hilakoko muuttui kohtuullisen paljon ja nämä tekijät heikkenivät mallinnuksen laatua.

Level set -yhtälön tarkoitus on laskea aineiden sekoittuneisuus hiloissa ja antaa sen pohjalta *two phase flow, level set 1* -yhtälöille, joiden tarkoitus on sitoa fluidien virtaus ja sekoittuminen yhteen.

Level set -yhtälö on muotoa

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (u\phi) = \gamma \nabla \cdot \left(\zeta \nabla \phi - \phi(1-\phi)\frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}\right), \tag{7}$$

jossa ϕ on arvo -1 ja 1 välillä seossuhteelle, ζ on elementin kokoon suhteutettu vakio, γ on parametri, joka kertoo stabilisoinnin vahvuuden. Liian pieni gamman arvo johtaa epävakaaseen laskentaan ja liian suuri puolestaan johtaa vääristymiin virtauksessa. Ohjeistusarvoksi on annettu sama kuin virtauksen suurin odotettava nopeus. yhtälön vasen puoli kertoo seossuhteen muutoksesta ja oikea puolen yhtälö on stabiiliuden kannalta välttämätön. (Grzybowski & Mosdorf 2014; Vetterling 2015)

Two phase flow, level set 1 -menetelmä sisältää kaksi yhtälöä, joista ensimmäinen kuvaa virtauksen keskimääräistä tiheyttä ja on muodoltaan

$$\rho = \rho_{1+\phi}(\rho_2 - \rho_1), \tag{8}$$

jossa ρ kuvaa virtauksen tiheyttä. Toisen yhtälön tarkoitus on laskea viskositeetin keskiarvo ja se on muotoa

$$\mu = \mu_1 + \phi(\mu_2 - \mu_1), \tag{9}$$

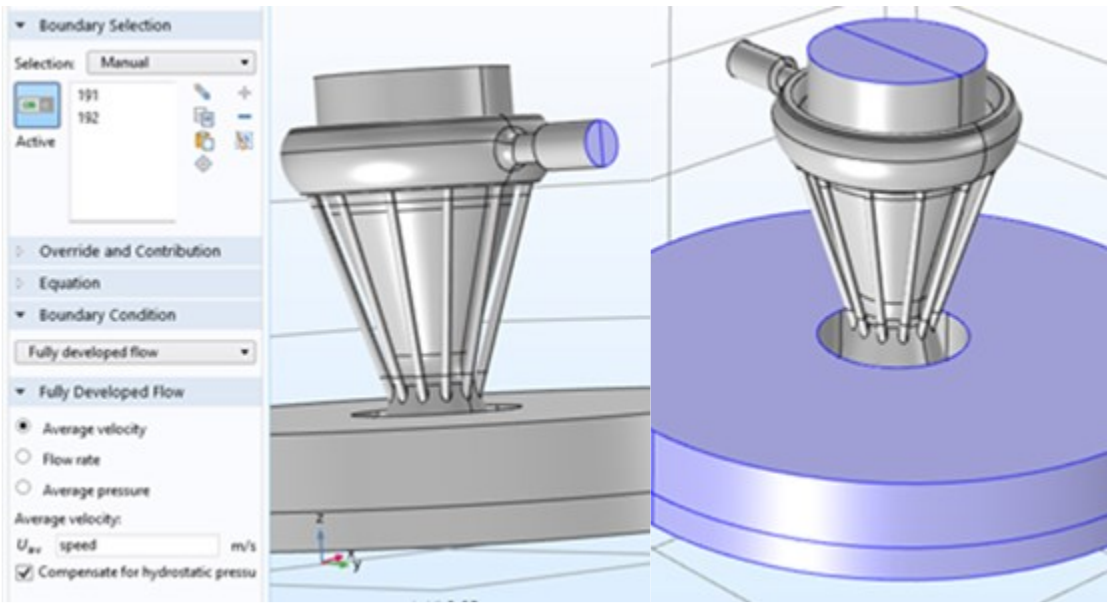
jossa myy on viskositeetti. Näistä kahdesta yhtälöstä saatavat arvot annetaan NS-yhtälölle laskettavaksi.

4. PARAMETRIT

Mallinnettavan geometrian monimutkaisuuden takia työssä jouduttiin muokkaamaan monia oletusasetuksia, mutta silti moni asetus jäi oletusarvoon. Seuraavissa kuvissa käydään läpi muokattuja arvoja, ja ilmoittamattomat arvot ovat jätetty *COMSOL multiphysics 5.4* oletusarvoille. Aluksi tässä luvussa esitetään virtaukseen liittyviä parametrejä, ja sitten hilaverkoston luomiseen liittyviä parametrejä.

4.1 Reunaehdot

Kuvassa 9a näkyy *laminar flow* -tutkimuksen tilavuusvirtauksenvirtauksen sisääntulo, jonka arvoksi on annettuna *speed*-parametri, jota muutettiin tutkiessa eri virtausnopeuksia. Sisään virtaus annettiin täysin kehittyneenä ja tälle annettiin keskinopeudeksi parametrinä 16,6e-5 m^3/s, jota muutettiin tutkiessa eri virtausnopeuksia. Kuvasta 9b puolestaan nähdään kaasujen ulostulot. *Level set* -tutkimuksessa käytettiin myös kuvan 9a sisääntuloa typelle. Myöskin nopeus asetettiin samaksi kuin sisään virtauksessa. Ulostulona kuitenkin käytettiin vain alempana olevia ulostuloja ja suuttimen yläosa asetettiin ilman nopeudettomaksi sisääntuloksi.

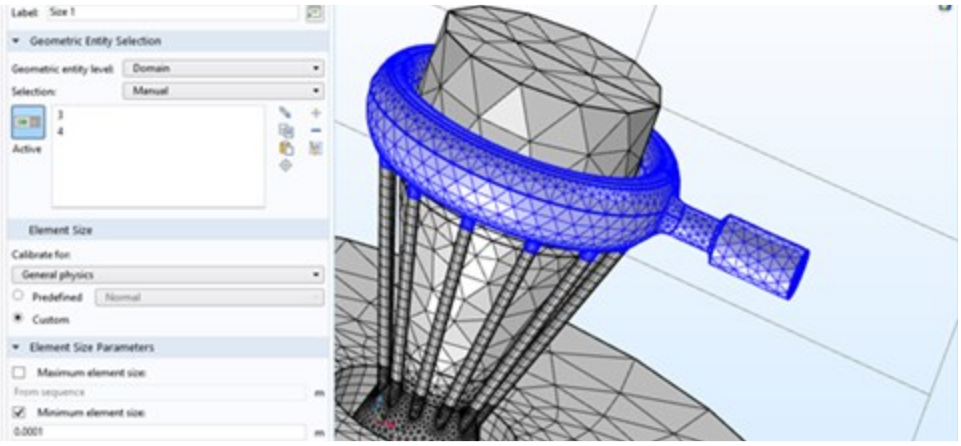


Kuva 9. *a) Suojakaasun sisään virtauksen valitut parametrit, sekä suojakaasun sisääntulo geometriassa. b) Valitut ulostulot kaasuille, joista ilma pääsee myös sisään.*

4.2 Verkottaminen

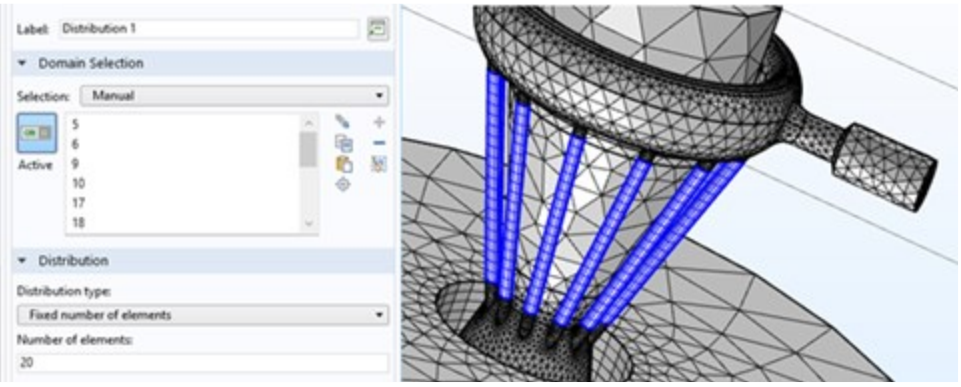
Seuraavaksi siirrytään hilaverkoston luomiseen, joka on esitetty samassa järjestyksessä, jossa ne ovat myös luotu mallinnusohjelmaan. Tämä siksi, että järjestyksen muuttaminen voi muuttaa myös elementin muodostumista, sillä hilan solmujen tulee olla kosketuksissa toisiinsa. Suutin jaettiin useisiin lohkoihin, jotta hilaverkoston luominen olisi helpompaa (Comsol Oy, 2015). Seuraavissa kuvissa käydään visuaalisesti läpi luotua hilaverkostoa.

Ensimmäisenä Luotiin kuvan 10 mukaisesti sisääntulo ja jakajan hilaverkosto mukaan lukien pieni pätkä suuttimen sisällä kulkevista putkista. Verkosto luotiin *TET*-menetelmällä ja oletusasetuksista vaihdettiin vain pienintä mahdollista hilakokoa arvoon 0,0001, jotta verkosto pystyisi kuvaamaan myös yksityiskohtaisempia alueita.



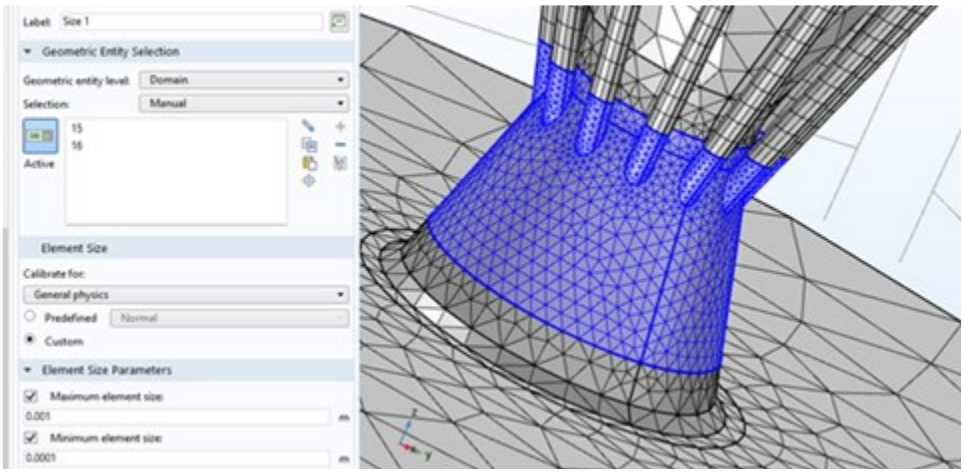
Kuva 10. *Ensimmäisenä luodun hilaverkoston parametrit ja rajat.*

Virtaus suuttimen sisällä on hyvin suoraviivaista, ja laskentatehon vähentämiseksi tällä alueella on käytetty *sweep*-komennolla luotuja pitkittäisiä hiloja kuvan 11 mukaisesti. Oletusasetuksista poiketen tälle alueelle valittiin 20 kerrosta elementtejä.



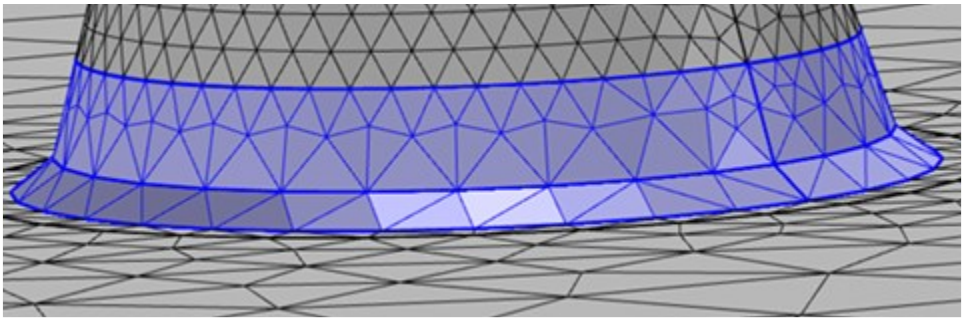
Kuva 11. *Suuttimen putkiston parametrit ja rajat.*

Seuraavaksi hilaverkostoitavaksi alueeksi valittiin sisäputkien loppuosa, sekä suuttimen laajentumisalue, jossa virtaavat kaasut sekoittuvat. Alueella käytettiin kuvan 12 mukaisesti *TET*-menetelmää. Hilan pienimmäksi kooksi valittiin myös 0,0001 ja Comsol Oy:n verkkosivujen (2020c) mukaisesti monifaasilaskennan hilojen kokoluokka on pyritty pitämään mahdollisimman tasaisena ja siksi hilojen suurimmaksi kooksi on valittu 0,001.



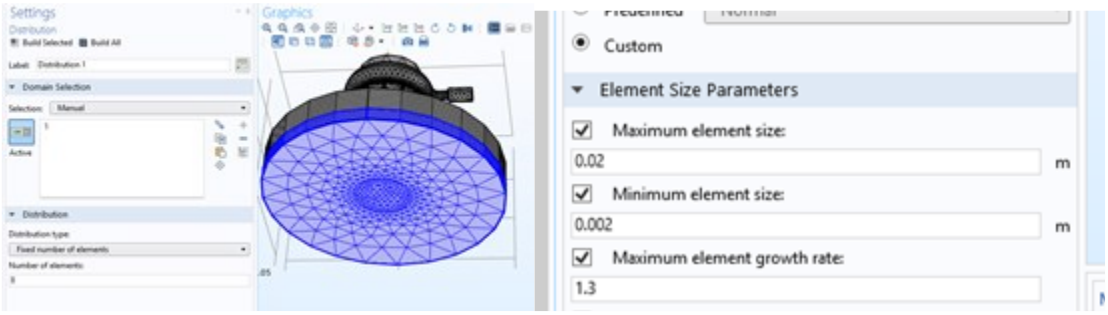
Kuva 12. *Virtausten sekoittumisosan hilaverkoston parametrit ja rajat.*

Seuraavaksi alueeksi otettiin suuttimen ulostulon pyöristysalue, joka tehtiin kuvan 13 mukaisesti TET-menetelmällä muuttamatta oletusasetuksia.



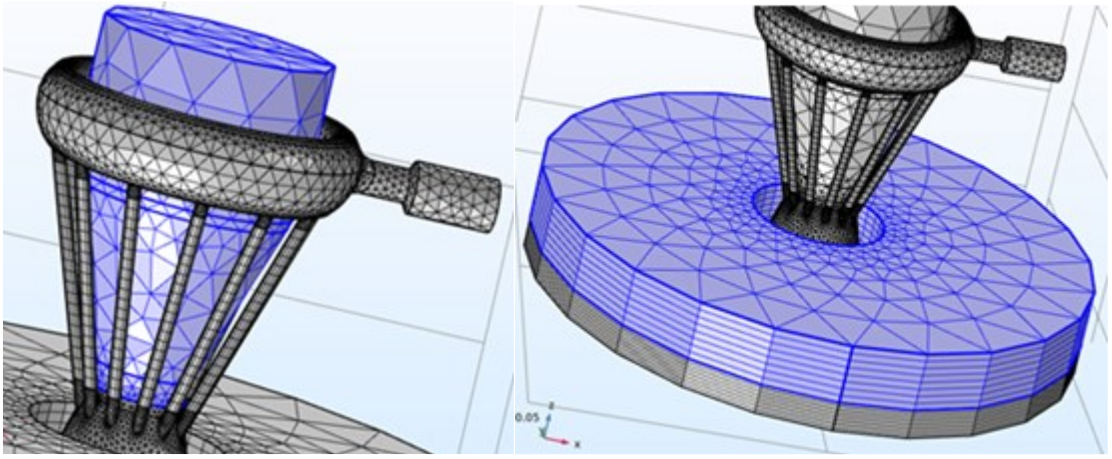
Kuva 13. *Suuttimen päädyn hilaverkoston parametrit ja rajat.*

Suuttimen jälkeistä alue, joka kuvastaa hitsattavan pinnan ja suuttimen välistä aluetta, luotiin *sweep*-menetelmän kolmiokuvioinnilla kuvan 14a mukaisesti. Kerrosten määräksi asetettiin 8, suurimmaksi hilakooksi 0,02, pienimmäksi 0,002 ja hilakoon kasvunopeudeksi 1,3. Kaikki muut asetukset pidettiin oletuksina, kuten kuvassa 14b on esitetty.



Kuva 14. *a) Suuttimen ja hitsaustason välisen alueen rajat. b) Suuttimen ja hitsaustason välisen alueen parametrit.*

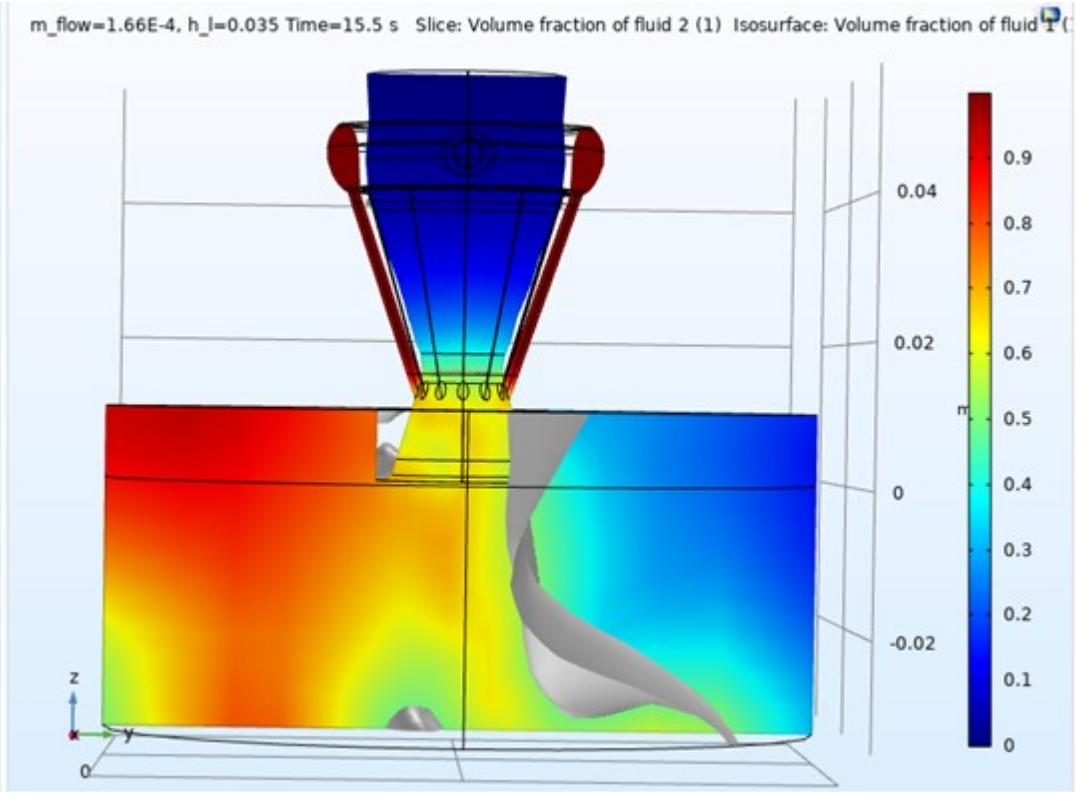
Toiseksi viimeisenä alueina luotiin suuttimen avoin alue, josta ilma ja laser pääsivät kulkemaan läpi. Kuvan 15a alue luotiin monimutkaisen geometrian vuoksi *TET*-menetelmällä muuttamatta oletusasetuksia. Viimeisenä alueena luotiin kuvan 15b mukainen alue, joka kuvastaa suuttimen yläpuolella olevaa ilmaa. Tämän alueen verkosto luotiin *sweep*-komennon kolmiokuvioinnilla ja hilakerroksien määräksi asetettiin kahdeksaan. Tämä alue saattoi olla mallinnuksen kannalta turha, mutta antoi hieman kuvaa virtauksen käyttäytymisestä litteän alueen ulkopuolella ja siten teki virtauksen todellisuuden arvioimisesta osaavammalle helpompaa



Kuva 15. *a) Suuttimen laserin kulkuaukon hilaverkon rajat. b) Suuttimen yläpuolella olevan ilmamassan hilaverkosto*

5. TULOKSET

Monifaasivirtauksesta on hankala saada stationaarista ratkaisua, sillä se on luonteeltaan jaksottaista. Tästä syystä tutkimuksessa on käytetty aikoihin jaettuja ratkaisuhetkiä. Kuvassa 16 on eräs ajan hetken ratkaisu. Näiden ratkaisujen pohjalta kehitettiin taulukot, joiden pohjalta on helpompi hahmottaa virtauksessa tapahtuvia muutoksia. Näitä muutoksia pyrittiin kuvaamaan suojakaasun tilavuusosuuden taajuudella, amplitudilla ja keskiarvolla. Luvussa 5.4 puolestaan tarkastellaan tulosten luotettavuutta pohdiskelevasti.



Kuva 16. *Esimerkki saadusta mallinnusdatasta. Harmaa taso kuvaa 0,5 tilavuusosuuden rajan.*

5.1 Tulosten parametrit

Aluksi tarkasteluväliksi valittiin 7 sekuntia 0,1 sekunnin aikaväleillä. Näiden arvojen pohjalta tehtiin mallinnukset 5:llä eri etäisyydelle 5:llä eri nopeudella eli yhteensä tällä aikavälillä mallinnuksia oli 25 kappaletta. Näiden tulosten pohjalta tultiin johtopäätökseen,

että tarkasteluväliä on pidennettävä 30 sekuntiin ja vain 4:n ääritapauksen mallintamiselle olevan tarpeellista. Tästä enemmän luvussa 4.2. Suojakaasun tavoitetaso on merkattu vihreällä vinoviiva alueella.

Tuloksia tarkastellessa kannattaa huomioida numeraalisen ratkaisijan suuri suhteellisen toleranssin arvo, joka oli asetettu 0,13 arvoon. Tämä kuitenkin nopeutti huomattavasti laskentaa.

Taulukko 1. *Mallinnusten parametreja*

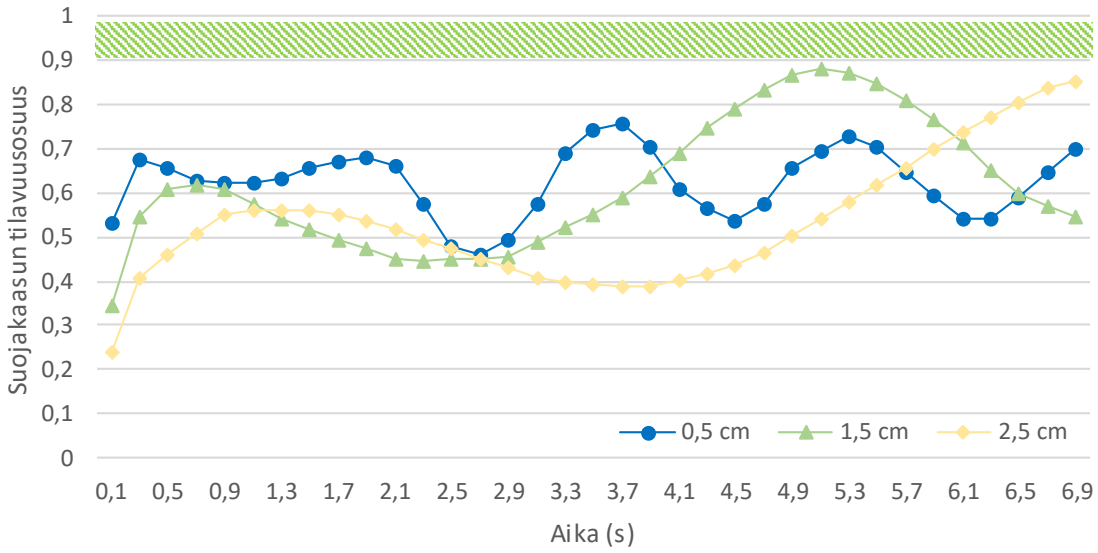
	tarkas-teluväli (s)	**aika-väli (s)**	**vir-taus (kpl)**	**etäi-syys (kpl)**	**välietäi-syys (mm)**	**mallin-nukset (kpl)**
1.mal-linnus	7	0,1	5	5	5	25
2.mal-linnus	30	0,5	2	2	5	4

5.2 Lyhyen aikavälin tarkastelu

Lyhyen aikavälin tarkastelu antoi kokonaisuuden kannalta suuntaa antavia tuloksia. Myöskin 0,1 sekunnin tarkasteluvälit mahdollistivat tiheämmän jaksottaisen muutoksen tarkastelun. Seuraavissa luvuissa tarkastelu on jaettu etäisyyden ja tilavuusvirtauksen muutosten vaikutukseen.

5.2.1 Etäisyyden vaikutus

Taulukosta 1 hahmottuu suojakaasun tilavuusosuuden käyttäytyvän siniaallon kaltaisesti. Etäisyyden kasvaessa hitsattavaan tason myöskin aallonpituus kasvaa. Tämä voi selittyä sillä, että suuttimen ja pinnan välille ei pysty syntymään niin suuria pyörteitä, kuin mitä välin ollessa suurempi. Ilmiö myös selittäisi amplitudin kasvamisen: pyörteiden yhdistyessä niiden vaiheet summautuvat.

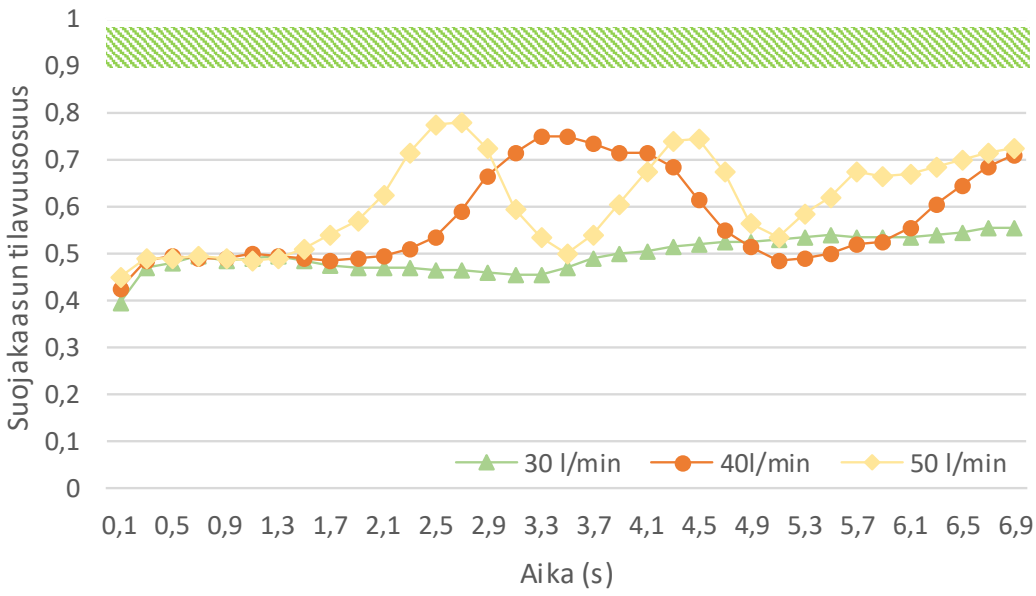


Kuva 17. *Suojakaasun osuus tilavuudesta suhteessa aikaan 10 l/min virtauksen syötöllä 5 mm, 15 mm ja 25 mm etäisyyksillä 7s aikavälillä.*

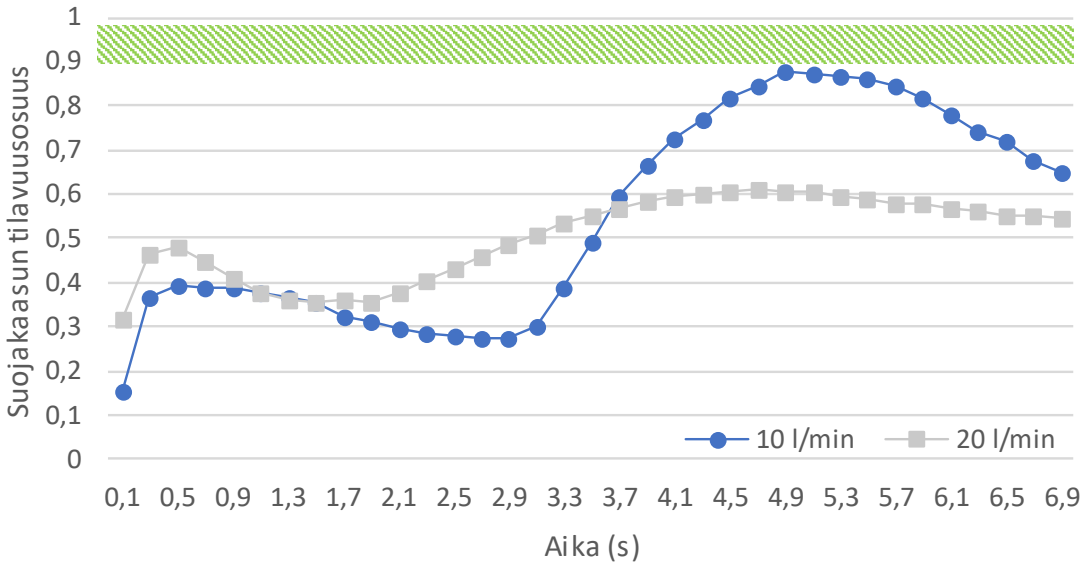
Kuvan 17 perusteella vaikuttaisi siltä, ettei etäisyyden muuttamisella ole juurikaan vaikutusta keskimääriseen suojakaasun tilavuusosuuteen ja se vaikuttaa olevan jokaisella etäisyydellä 0,6 tasoa. Kuitenkin 25 mm etäisyydellä tätä ei voida sanoa varmaksi ja siksi tuloksia tarkastellaan myöhemmin myös pidemmällä aikavälillä.

5.2.2 Tilavuusvirran vaikutus

Kuvan 18 perusteella näyttäisi siltä, että tilavuusvirtauksen kasvattaminen johtaisi aallonpituuden kasvattamiseen, mutta ei lisäisi vain hivenen keskimääräistä suojakaasun tilavuusosuutta. Kuitenkin kuvasta 19 nähdään matalamman virtausnopeuden kaasujen käyttäytyvän poikkeavasti. Kuvaajasta ei voi tehdä juurikaan johtopäätöksiä ja siksi myös tämän asian tarkasteluun tarvitaan pidempää tarkasteluväliä.



Kuva 18. *Suojakaasun osuus tilavuudesta suhteessa aikaan suuttimen etäisyyden pintaan ollessa 25 mm ja virtausten ollessa 30 l/min, 40 l/min ja 50 l/min.*



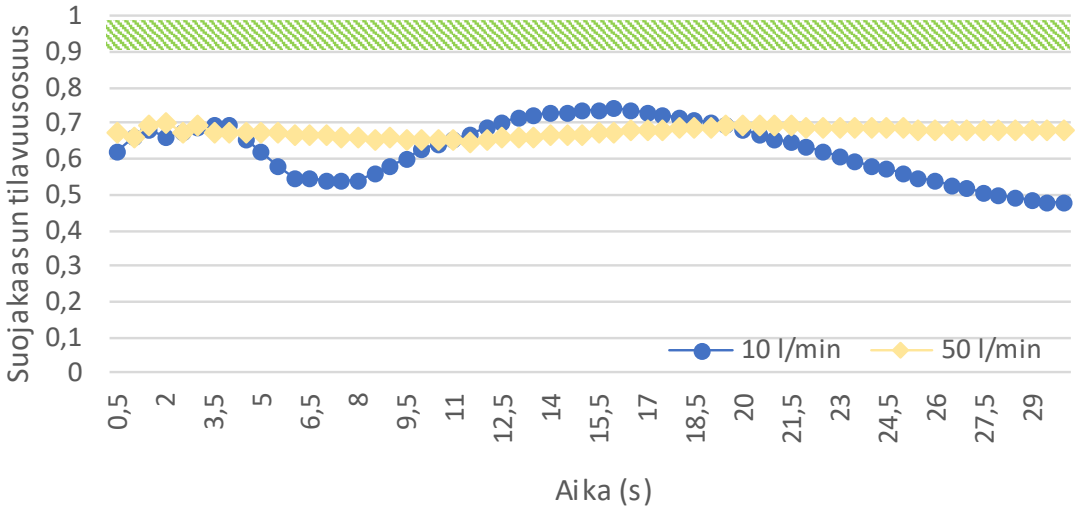
Kuva 19. *Suojakaasun osuus tilavuudesta suhteessa aikaan suuttimen etäisyyden pintaan ollessa 25 mm ja virtauksen ollessa 10 l/min ja 20 l/min.*

Alustavasti kuitenkin vaikuttaa siltä, että tilavuusvirtauksen ollessa 30 l/min on saavutettu jonkinlainen tasapainotila. Suuremmat ja pienemmät tilavuusvirtaukset aiheuttavat jaksollisuutta.

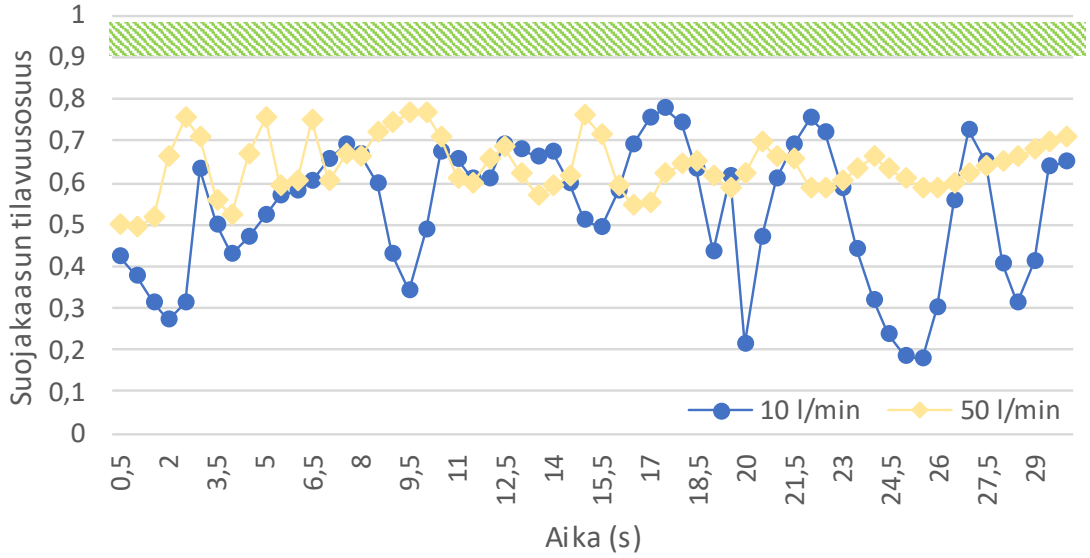
Puolestaan virtauksen vähentyessä alle 30 l/min tason vaikuttaisi myös virtauksen taajuus lähtevän kasvamaan. Lisäksi amplitudi vaikuttaisi kasvavan alle 30 l/min virtauksilla tilavuusvirtauksen laskiessa. Yli 30 l/min tilavuusvirroilla puolestaan amplitudin alaraja vaikuttaa olevan 30 l/min tasoa ja maksimin olevan kummassakin tilanteessa 0,8 tasoa.

5.3 Pitkän aikavälin tarkastelu

Pitkällä aikavälillä pystyy varmistamaan paremmin, miten tilavuusvirtaus kehittyy, ja onko virtaus kehittynyttä. Pidemmällä tarkasteluvälillä käytettiin kuitenkin 0,5 sekunnin pituisia tarkasteluhetkiä. Tämän takia lyhytjaksoiset muutokset eivät näy tuloksissa. Tässä luvussa esitetään tulokset kuvat 20 ja 21, ja seuraavissa alaluvuissa käydään niiden analyysiä läpi.



Kuva 20. *Suojakaasun osuus tilavuudesta suhteessa aikaan 5 mm etäisyydellä suhteessa aikaan 10 l/min verrattuna 50 l/min virtauksella 30 sekunnin aikavälillä.*



Kuva 21. *Suojakaasun osuus tilavuudesta suhteessa aikaan 25 mm etäisyydellä 10 l/min verrattuna 50 l/min 30 sekunnin aikavälillä.*

5.3.1 Etäisyyden vaikutus

Kuvassa 20 on tilavuusvirtaukset pinnan ollessa 5 mm etäisyydellä. kuvassa 21 puolestaan on tilavuusvirtaukset pinnan ollessa 25 mm etäisyydellä. Etäisyyttä tarkasteltaessa on siis vertailtava kuvan 20 ja 21 saman värisiä kuvaajia.

Verratessa kuvaajia huomataan molemmilla virtausnopeudella etäisyyden kasvattamisen pidentävän aallonpituutta, pienentävän amplitudia, sekä kasvattavan hieman keskiarvoa. Tulos vahvistaa lyhyemmän aikavälin tarkastelussa tehtyä johtopäätöstä.

5.3.2 Tilavuusvirtauksen vaikutus

Tarkastellessa tilavuusvirtauksien eroja, täytyy vertailla taulukoissa olevia tilavuusvirtoja keskenään. Molemmilla etäisyyksillä tilavuusvirran kasvattaminen pienentää amplitudia ja nostaa hieman keskiarvoa. Tilavuusvirtauksen lisäämisestä johtuvaa keskiarvon kasvua tapahtui kuitenkin huomattavasti enemmän etäisyyden ollessa suuri, minkä voi nähdä kuvasta 21.

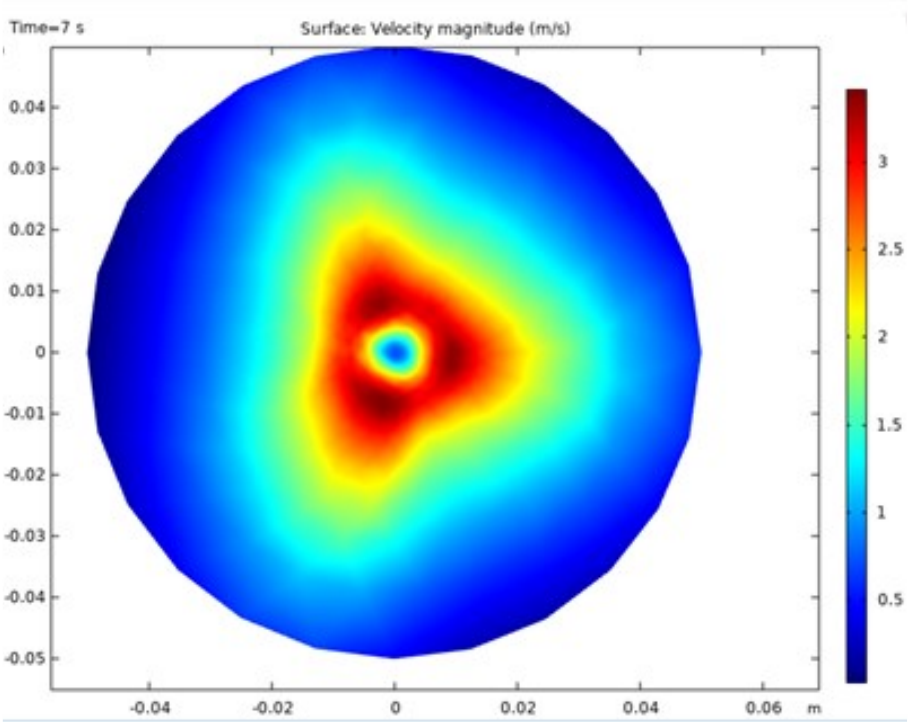
5.4 Tulosten tarkastelu

Seuraavassa luvussa käydään läpi mallinnuksen tulosten tarkastelua. Tarkasteltavina kohteina on virtausnopeuden jakautuminen, laskentanopeus sekä turbulenttimallin vaikutus laskentanopeuteen ja tuloksiin.

Virtausnopeuden jakaumalla pohditaan syitä esiintyvän jaksollisuuden epätasaisuudelle. Laskentanopeudella ja turbulenssimallilla puolestaan pohditaan, miten tutkittua virtausmallia voitaisiin parantaa.

5.4.1 Virtausjakauma

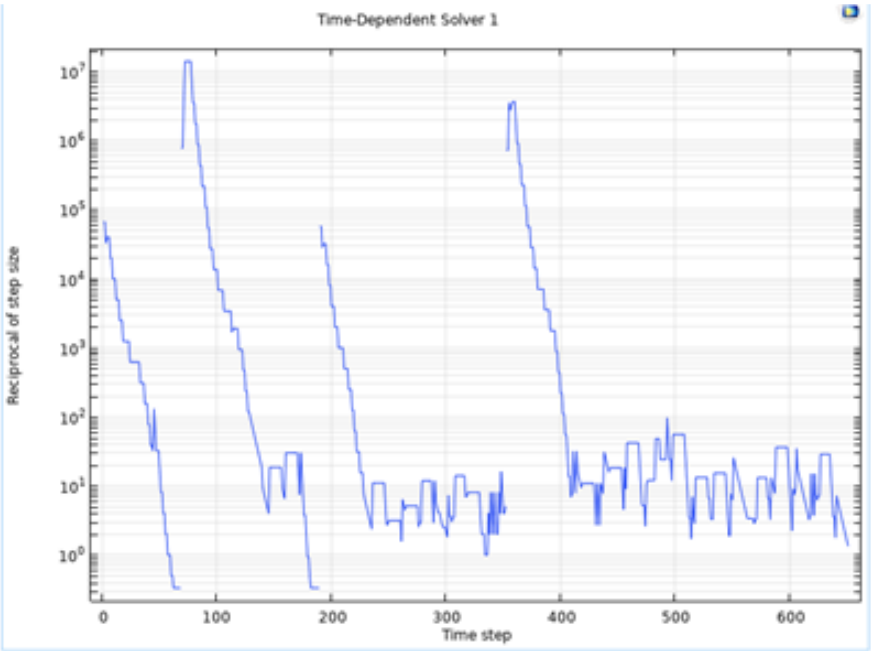
Kuvan 22 perusteella suojakaasun nopeusjakauma on kolmion mallinen, eli suojakaasu leviää epätasaisesti ympäristöönsä. Tämä voi olla yksi selittävä tekijä keskikohdan suojakaasun tilavuusosuuden oudossa käyttäytymisessä. Jakaumaa voisi parantaa tasaisemmaksi ahdistamalla tulopään lähellä olevien putkien sisäänpääsyä, sekä sisääntulon vastapäätä olevia putkistoja.



Kuva 22. *Nopeusjakauma 1 mm päässä pinnasta, kun suuttimen etäisyys pinnasta on 5 mm, virtausnopeus 10 l/min ja virtauksen sisääntulo vasemmassa reunassa.*

5.4.2 Laskentanopeus

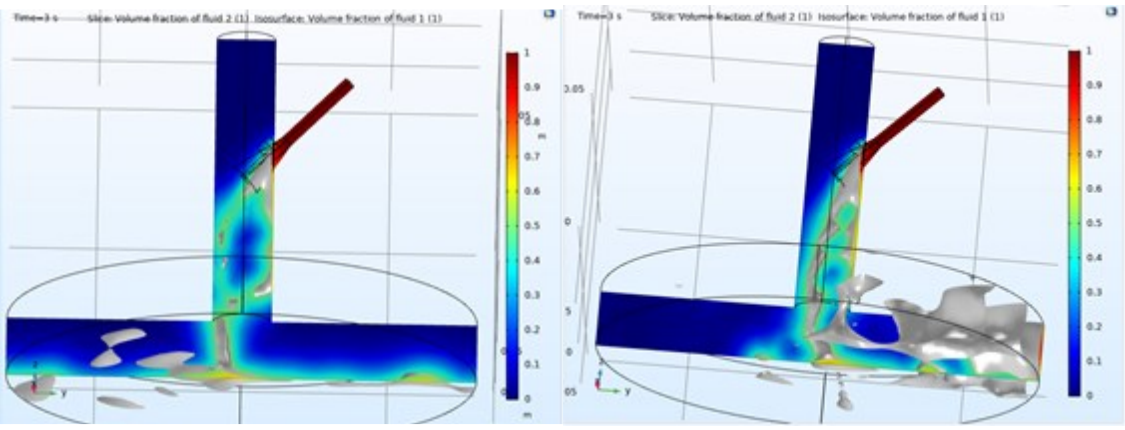
Kuten kuvasta 23 nähdään, aika-askeleen pituus kasvoi mallinnuksen ajan kuluessa. Kaikkein eniten aikaa kuluttavaa oli siis mallinnuksen ensimmäisten sekuntien mallinnus. Ensimmäiset kaksi viivaa tulivat 0,5 cm pinnan etäisyyden laskemisesta ja niissä trendi oli koko ajan laskeva ja parhaimmillaan pääsi melkein 10 s hyppyihin aika-askeleelta. Laskenta oli hyvin stabiilia verrattuna seuraavaan kahteen 3,5 cm etäisyydelle mallinnettuun tilanteeseen. Näissä virtauksen liikehdintä oli vaihtelevampaa ja luultavasti tästä syystä aika-askel asettui noin 0,5 s tasolle.



Kuva 23. *Tulosten aika-askeleiden pituus aika-askeleiden kuluessa 30 sekunnin mallinnuksissa.*

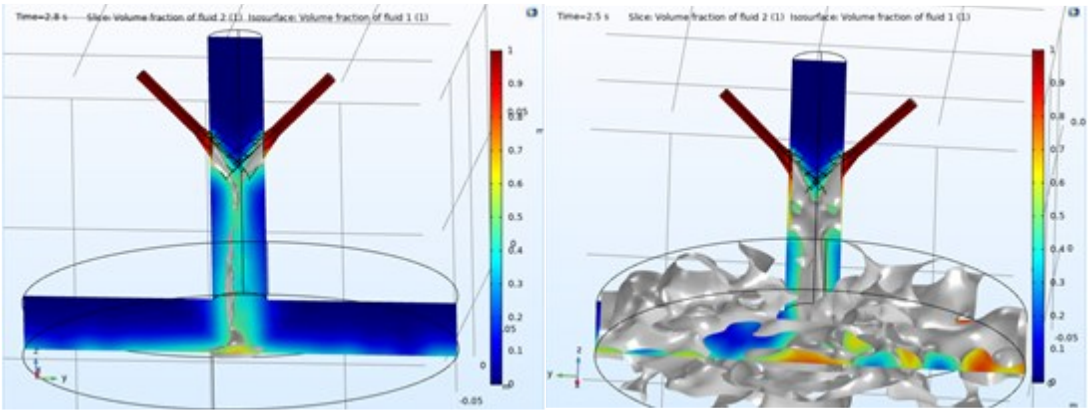
5.4.3 Turbulenssimalli

Kuten kuvista 24a ja 24b nähdään, Turbulenssimallien käytöllä on suuri vaikutus virtauksen muodostumiseen, mutta se on enemmän aikaa vievää. Turbulentissa virtauksessa aineet ovat jakautuneet tasaisemmin keskenään. Laminaarisessa virtauksessa on puolestaan nähtävillä suuttimen paksummassa osassa olevan vain yksi iso pyörre. Lopputuloksena kumpikin malli antaa kohtuullisen samankaltaisen tuloksen virtauksesta. Suurimpana erona on suojakaasun tihentymän keskikohdan sijainti: Laminaarisessa keskikohta sijaitsee tuloaukkoa vastapäätä, kun taas turbulentissa mallissa tulopään puolella.



Kuva 24. *a) Laminaarisuus oletuksella tehty mallinnus yksinkertaistetusta yksihaaraisesta suuttimesta. Aikaa kului laskentaan 25 min. b) k- ε -turbulenttimallilla tehty mallinnus yksinkertaistetusta yksihaaraisesta suuttimesta. Aikaa kului laskentaan 2 h 46 min.*

Kuten kuvissa 25a ja 25b näkyy, kaksituloisessa geometriassa virtauksen ollessa laminaarista suojakaasut yhdistyvät keskenään ja liikkuvat tasaisesti. Turbulenttisessa mallissa puolestaan suojakaasut sekoittuvat voimakkaammin. Tämän seurauksena turbulenttisessa mallissa yläpuolelta tuleva ilmaa ei pääse sekoittumaan niin paljoa suojakaasuun, ja siten hitsauspintaan muodostuva suojakerros on vahvempi kuin laminaarisessa mallinnuksessa.



Kuva 25. *a) Laminaarisella virtauksella oletettu mallinnus yksinkertaistetusta kaksihaaraisesta suuttimesta. Aikaa kului laskentaan 35 min. b) k- ε -turbulenttimallilla tehty mallinnus yksinkertaistetusta kaksihaaraisesta suuttimesta. Aikaa kului laskentaan 2 h 30 min.*

6. YHTEENVETO

6.1 Tulosten yhteenveto

Mallinnuksen perusteella pinnan etäisyydellä eikä syöttönopeudella ollut suurta muutosta suojakaasun tilavuudenosuuteen pinnalla. Mikään tuloksista ei päässyt haluttuun keskimääräiseen 0,9 suojakaasun tilavuusosuuteen. Kaikki tulokset olivat suuruusluokalta 0,5–0,65 keskiarvoa. Tästä voidaan päätellä suuttimen imevän virratessaan mukaansa yläpuolelta suurin piirtein vakiomäärän ilmaa suhteessa suojakaasuun.

Suojakaasun osuutta hitsauspinnalla ei siis voida parantaa kovinkaan paljoa muuttamalla etäisyyttä tai syöttönopeutta, mikäli kaasut pääsevät mallinnuksen mukaisesti poistumaan vapaasti tasaiselta hitsausalueelta.

6.2 Mallinnuksen parantamisehdotukset

Käyttäessä turbulenssimalleja aika-akseli lyheni niin lyhyeksi, ettei COMSOL kyennyt ratkomaan niitä. Toisin sanoen Turbulenssimallit tekivät laskennasta liian epästabiilia ja siksi mallinnus ei onnistunut. Turbulenssimallin puute teki malleista hyvin vaillinaisen, kuten luvussa 4.3.3 kävi ilmi. Siksi olisi hyvä tutustua vähintään kahteen yleisimpään turbulenssimalliin, eli *k-ε* ja *SST*-malleihin, sekä niiden geometriavaatimuksiin. Olisi myös hyvä tutustua COMSOLin laskentaan, jotta osaisi muodostaa mahdollisimman toimivan hilaverkoston, sillä tässä työssä on turvauduttu vain COMSOLin ohjeisiin. Myös *Level Set* -kaavoihin tulisi keskittyä paremmin, jotta ymmärtäisi matemaattisesti eri asetusten merkitykset.

Mallintamisessa kaikkein eniten laskentatehoa vievää oli luvun 5.4.2 mukaisesti ensimmäisten tulosten muodostaminen. Tästä syystä mallinnettaessa tarkasteluvälin lyhentäminen ei ole tehokas keino lyhentää laskenta-aikaa. Yksi mahdollinen keino lyhentää laskenta-aikaa on muokata COMSOLin alkuarvausten oletusasetuksia (Comsol Oy 2020a).

Myös geometriaa olisi pitänyt yksinkertaistaa huomattavasti. Virtauksen jakautumista voi tutkia ilman *level set* -menetelmää laskennan säästämiseksi ja sen pohjalta leikata geometrian virtauksenjakajat ja jättää jäljelle putkien päädyt ja asettaa niihin sisääntulovirtaukset aiemmin mallinnetun jakauman pohjalta. Toisin sanoen kuvien 12 ja 13 geometriat tulisi jättää pois, jolloin säästyisi paljon laskentatehoa. Lisäksi putkien sisääntuloa

tulisi myös pyöristää, sillä se parantaisi Comsolin ohjeiden mukaisesti mallinnuksen laatua.

Mallinnuksen tarkkuutta tulisi tarkastaa pienentämällä suhteellista tarkkuutta niin kauan, että sen pienentäminen ei vaikuttaisi tuloksiin. Tämä tarkastelu on kokonaan jätetty pois työstä. Mallinnus kuuluisi myös suorittaa pienemmällä hilakoolla niin kauan, ettei se enää vaikuta tuloksiin. Myöskin tämä tarkastelu on jätetty työssä pois ajan säästämiseksi.

6.3 Suuttimen parantamisehdotukset

Edellisen luvun mukaisesti putkien sisääntulon pyöristäminen parantaisi mallinnuksen todellisuutta, mutta myös mahdollisesti suuttimen suorituskykyä. Pyöristyksen seurauksena suojakaasua pääsisi mahdollisesti karkaamaan suuttimen yläosasta. Tämän seurauksena ilman imeytyminen suojakaasun sekaan saattaisi vähentyä, ja siten parantaa suuttimen maksimaalista suorituskykyä.

Tulosten perusteella olisi järkevää pyrkiä muuttamaan suuttimen geometriaa siten, että ilman sekoittuminen suuttimen yläosasta vähenisi. Tämä olisi mahdollista kaventamalla ja pidentämällä suuttimen yläosan sädettä, jolloin ilman virtaaminen putkessa kohdistuisi enemmän vastusta. Lisäksi suuttimen yläoton voisi tukkia laseria läpäisevällä lasilla, jolloin ilman sekoittuminen yläotosta vähenisi huomattavasti.

LÄHTEET

Bitharas, I. McPherson, N. McGhie, W. Roy, D. Moore, A. 2018. Visualisation and optimisation of shielding gas coverage during gas metal arc welding. Artikkeli. Kuva 3. Saatavilla: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401361730568X?via%3Dihub. Viitattu 14.3.2020

Comsol Oy, multiphysics encyclopedia. 2017a. Finite Element Mesh Refinement. Artikkeli. Saatavilla: https://www.comsol.com/multiphysics/mesh-refinement. Viitattu 14.3.2020

Comsol Oy, multiphysics encyclopedia. 2017b. Navier-Stokes Equations. Artikkeli. Saatavilla: https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations. Viitattu 14.3.2020

Comsol Oy. 2020a Solving time dependent models with inconsistent initial values. Artikkeli. Saatavilla: https://www.comsol.com/support/knowledgebase/1172 Viitattu 29.4.2020

Comsol Oy. 2020b. The Level Set Method. Dokumentti. Saatavilla: https://www.comsol.jp/sales/download/609441/multiphase_flow_free_surfaces.pdf Viitattu 15.4.2020

Comsol Oy. 2020c. Two-Phase Modeling Guidelines. Verkkosivu. Viitattu 1.4.2020

Ferzinger, j. Perić, M. 1997. Computational Methods for Fluid Dynamics, ISBN 3-540-59434-5, s. 5-9, 12, 23, 32, 253-255.

Fontes, E. 2018. Two Methods for Modelling Free Surfaces in COMSOL Multiphysics®. Blogi -teksti. Saatavilla: https://www.comsol.com/blogs/two-methods-for-modeling-free-surfaces-in-comsol-multiphysics/. Viitattu 15.3.2020

Frei, W. Comsol Oy. 2013. Meshing Considerations for Linear Static Problems. Artikkeli. Kuva 4 Saatavilla:https://www.comsol.com/blogs/meshing-considerations-linear-static-problems/ Viitattu 14.3.2020

Frei, W. Comsol Oy. 2015. Improving Your Meshing with Partitioning. Artikkeli. Saatavilla: https://www.comsol.com/blogs/improving-your-meshing-with-partitioning/. Viitattu 14.3.2020

Frei, W. Comsol Oy. 2017a. Improving Your Meshing with Swept Meshes. Artikkeli. Saatavilla:https://www.comsol.com/blogs/improving-your-meshing-with-swept-meshes/. Viitattu 14.3.2020

Frei, W. Comsol Oy. 2017b. Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?. Blogi teksti. Kuvat 8 ja 9. Saatavilla: https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/. Viitattu 14.3.2020

Grzybowski, H. Mosdorf, R. 2014. Modelling of two-phase flow in a minichannel using level-set method. Artikkeli. Saatavilla: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/530/1/012049 Viitattu 29.4.2020

Hidetoshi, F. Shanping, L. Toyoyoki, S. Kiyoshi,N. 2008. Effect of Oxygen Content in He-O2 Shielding Gas on Weld Shape for Ultra Deep Penetration TIG. Artikkeli. Saatavissa: http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/publication/trans-jwri/pdf/371-04.pdf Viitattu 14.3.2020

Kolehmainen, J. 2013. Simulation of assist gas flow in laser cutting with high performance nozzles. Diplomityö. Saatavilla: https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21426/kolehmainen.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Viitattu 14.3.2020

Li, X. Xie, J. Zhou, Y. 2005. Effects of oxygen contamination in the argon shielding gas in laser welding of commercially pure titanium thin sheet. Artikkeli. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/226994120_Effects_of_oxygen_contamination_in_the_argon_shielding_gas_in_laser_welding_of_commercially_pure_titanium_thin_sheet#pf4 Viitattu 14.3.2020

Schlegel, F. Comsol Oy. 2015. Which Multiphase Flow Interface Should I Use? Saatavissa: https://www.comsol.com/blogs/which-multiphase-flow-interface-should-i-use/ Viitattu 14.3.2020

Siikonen, T. 2014. Virtaussimulointi. Oppimateriaali, Aalto University School of Engineering. Saatavissa:https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/38333/mod_resource/content/2/Opetusvideot%20tekstin%C3%A4_kaikki_V2.pdf. Viitattu 14.3.2020

Steen, W.M. Mazumder, J. 2010. Laser Material Processing. Artikkeli. Saatavilla: https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/chapter/10.1007%2F978-1-84996-062-5_5 Viitattu 14.3.2020

Teräsrakenneyhdistys. Teräs materiaalina. http://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/terasrakenneteollisuus/teras-materiaalina/terasta-ja-rautaa/ Viitattu 14.3.2020

Vetterling, W.T. 2015. Multiphase Laminar Flow with More Than Two Phases. Artikkeli. Saatavilla: https://www.comsol.com/paper/multiphase-laminar-flow-with-more-than-two-phases-26282 .Viitattu 15.3.2020