

Teemu Lehtonen

HITSAUSPROSESSIN PARTIKKELI- SUUTTIMEN VIRTAUKSEN MALLINNUS

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Teemu Lehtonen: Hitsausprosessin partikkelisuuttimen virtauksen mallinnus
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden TkK-tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2020

Tässä työssä tutkitaan CMT-hitsauslaitteiston (Cold Metal Transfer) partikkelisuuttimen toimintaa numeerista virtauslaskentaa hyödyntäen. Työn tavoitteena on selvittää karbidipartikkelien jakauma hitsattavan kappaleen pinnalla sekä partikkelien kantokaasun vaikutus suojakaasun kattavuuteen. Virtauslaskennan tuloksien perusteella esitetään mahdollisia muutosehdotuksia suuttimelle paremman toiminnan saavuttamiseksi.

Työssä perehdyttiin ensin partikkelisuuttimen virtauslaskennan teoriaan, minkä pohjalta selvitettiin erikoisvaatimukset laskennan suorittamiseksi. Tämän jälkeen hitsauspolttimesta luotiin 3D-malli, joka valmisteltiin laskentaa varten ANSYS SpaceClaim ja ANSYS Fluent Meshing ohjelmilla. Virtauslaskenta suoritettiin ennalta määrätyillä reunaehdoilla ANSYS Fluent ohjelmistolla.

Simulaatioiden perusteella suuttimen todettiin toimivan hyvin heikosti käyttökohteessaan. Vain noin 10% syötetyistä partikkeleista saavutti halutun alueen, loppujen iskeytyessä liian aikaisin kappaleen pintaan. Partikkelien hajontakuvio saavutti hyväksytyt tason yli 4 mm leveiden hitsisaumojen tapauksessa, mutta kapeammilla hitsisaumoilla suuttimen toiminta ei ole kovin taloudellista. Myös suojakaasun kattavuudessa huomattiin puutteita kyseisellä suutinmallilla. Suuttimessa kulkeva 100-prosenttinen argon saavuttaa huomattavasti suuremman virtausnopeuden ja syrjäyttää MISON 18-suojakaasun hitsisulan ympäristössä.

Tuloksien perusteella esitettiin useita muutosehdotuksia tuleville suutinmalleille. Muutoksilla pyritään vaikuttamaan sekä partikkelien hajontaan että suojakaasun kattavuuteen. Partikkelien hajontaan vaikuttavat muutokset perustuvat pääasiassa muutoksiin suuttimen suuntauksessa ja geometriassa. Suojakaasun kattavuuteen voidaan vaikuttaa jopa ilman geometriamuutoksia vaihtamalla kantokaasu samaksi kuin käytettävä suojakaasu.

Avainsanat: ANSYS, virtauslaskenta, CMT-hitsaus, partikkelisuutin, kovahitsaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TEORIA	2
2.1 MAG/MIG-hitsaus	2
2.1.1 CMT-hitsaus	3
2.1.2 Kovahitsaus	4
2.2 Numeerinen virtauslaskenta	5
2.2.1 Hallitsevat yhtälöt	5
2.2.2 Turbulenssi	6
2.2.3 Partikkelit virtauksessa	7
3. SUUTTIMEN NUMEERINEN VIRT AUSLASKENTA	10
3.1 Geometrian luonti	10
3.1.1 Rajoitukset	10
3.1.2 3D-mallinnus	11
3.2 Mallin valmistelu	12
3.3 Verkotus	13
3.4 Laskenta	15
4. TULOKSET	16
4.1 Partikkelien hajonta	16
4.2 Suojakaasun kattavuus	17
5. PARANNUSEHDOTUKSET	20
5.1 Partikkelit	20
5.2 Suojakaasu	20
6. YHTEENVETO	22
LÄHTEET	23

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CAD	engl. Computer-aided design, tietokoneavusteinen mallinnus
CFD	engl. Computational fluid dynamics, numeerinen virtauslaskenta
CMT-hitsaus	engl. Cold metal transfer, kylmäkaarihitsaus
DPM	engl. Discrete phase model, diskreetti faasimalli
MAG	engl. Metal active gas, hitsausprosessi aktiivisella suojakaasulla
MIG	engl. Metal inert gas, hitsausprosessi inertillä suojakaasulla
k	kineettinen energia
p	paine
t	aika
u	nopeus
V_{cell}	kontrollitilavuus
V_s	partikkelien tilavuus kontrollitilavuudessa
x	etäisyys
α_s	partikkelien suhteellinen määrä kontrollitilavuudessa
ε	turbulenssin dissipaatio
ρ	tiheys
μ	dynaaminen viskositeetti
ω	ominaisdissipaatio

1. JOHDANTO

Kuluminen aiheuttaa huomattavan osa teollisuuden kokonaiskustannuksista. Komponenttien kulumisen vaatii jatkuvaa kunnossapitoa ja aiheuttaa konerikkoja, jotka johtavat taloudellisiin menetyksiin. Kulumisen minimoimiseksi on käytössä useita menetelmiä, kuten voitelu sekä erilaiset pinnoitteet ja materiaalivalinnat. Eräs laajasti käytetty menetelmä on kovahitsaus, joka kasvattaa tuotteen kulumiskestävyyttä lisäämällä pehmeämmän kappaleen pinnalle kovempi pinnoite hitsaustekniikkaa hyödyntäen. Kovahitsauksessa hitsisulaan syötetään karbidipartikkeleita joko jauheena tai lisäaineeseen seostettuina. Menetelmän taloudellisuuden kannalta on ensiarvoisen tärkeää saada mahdollisimman korkea kulutuskestävyys mahdollisimman pienellä määrällä partikkeleita.

Tämä työn tavoitteena on tutkia Tampereen yliopiston tuotantotekniikan laboratoriossa sijaitsevan Fronius CMT Advanced -hitsauslaitteen partikkelisuuttimen suorituskykyä. Numeerisen virtauslaskennan avulla selvittää karbidipartikkelien jakauma hitsattavan kappaleen pinnalla sekä partikkelien kantokaasun vaikutus suojakaasun kattavuuteen. Virtauslaskennan tuloksien perusteella esitetään muutosehdotuksia suuttimelle paremman suorituskyvyn saavuttamiseksi.

Työn toisessa luvussa esitellään käytössä olevan hitsauslaitteiston toimintaperiaate sekä numeerisen virtauslaskennan teoriaa työhön sovellettavien osien. Kolmannessa luvussa käydään läpi suuttimen geometrian rajoitukset sekä mallin valmistelu laskentaa varten. Valmisteluun kuuluu nestetilavuuden tilamallin luonti, tilavuuden verkotus sekä laskennan parametrien ja reunaehtojen asetus. Tulosten esittely ja arviointi toteutetaan luvussa viisi ja muutosehdotukset esitellään luvussa kuusi. Lopuksi yhteenvedossa esitetään johtopäätöksiä suuttimen suorituskyvystä.

2. TEORIA

Teorialuku jakautuu kahteen osaan, joista ensimmäisessä käsitellään hitsausprosesseja ja toisessa numeerisen virtauslaskennan perusteita työhön soveltuvissa määrin. Hitsausprosesseista käydään läpi MIG/MAG-hitsaus, CMT-hitsaus ja kovahitsaus. Numeerisesta virtauslaskennasta käsitellään laskennassa tarvittavat yhtälöt, turbulenssi ja partikkelien vaikutus virtaukseen.

2.1 MAG/MIG-hitsaus

MAG/MAG-hitsaus (Metal active gas welding / Metal inert gas welding, metallikaasukaa-rihitsaus aktiivisella / inertillä suojakaasulla) on hitsausprosessi, jossa valokaari palaa automaattisesti syötettävän lisäainelangan ja työkappaleen välillä suojakaasun ympäröimänä. MIG/MAG-hitsauksen etuja ovat nopeus ja hitsin puhtaus, sillä hitsin päälle ei normaalisti muodostu kuonakerrosta kuten puikkohitsauksessa. (Lepola & Makkonen, 2005, s.11)

MAG/MIG-hitsauslaitteiston pääkomponentit ovat hitsausvirtalähde, langansyöttöjärjestelmä, suojakaasulaitteisto ja hitsauspistooli (Lepola & Makkonen, 2005, s.103). Mikäli kyseessä on täysin automaattinen hitsausjärjestelmä, kuuluu siihen myös teollisuusrobotti tai vastaava polttimen liikkeen mahdollistava laite.

Suojakaasu on hyvin tärkeä osa hitsausprosessia. Sen tarkoituksena on syrjäyttää happi sulan ympäriltä, jotta kemiallisia reaktioita ei tapahtuisi prosessissa. Suojakaasun toissijainen tehtävä on jäähdyttää hitsauspoltinta suurilla hitsausvirroilla. MAG-hitsauksessa käytetään aktiivista, eli sulan kanssa reagoivaa kaasua. Tällaisia kaasuja ovat esimerkiksi hiilidioksidi, happi ja typpi. MIG-hitsauksessa käytetään inerttiä, eli sulan kanssa reagoimatonta kaasua. (Lepola & Makkonen, 2005, s.103) Näihin kaasuihin kuuluvat esimerkiksi helium ja argon. Suojakaasun syöttämiseen voidaan käyttää joko hitsauspoltinta ja erillistä kaasupulloa tai lisäainelankaa, joka sisältää suojakaasua tuottavaa materiaalia hitsatessa. Suojakaasua tuottavaa materiaalia sisältävää lisäainelankaa kutsutaan ydintäytelangaksi.

MIG/MAG-hitsauksen parametreja muuttamalla on mahdollista hitsata erityyppisillä kaaritapahtumilla, joita ovat lyhyt-, väli-, kuuma- ja pulssikaari. Lyhytkaarihitsauksessa lisäainelangan ja perusaineen välille muodostuu oikosulku 30-200 kertaa sekunnissa. Oikosulun aikana tapahtuu nopea langan sulaminen ja valokaari syttyy uudelleen. Oikosulkujen aikana valokaari on sammunut, joten lämmöntuonti on suhteellisen pientä ja sulan alue on myös pieni. Lyhytkaarihitsausta käytetään pääasiassa ohuiden levyjen liittämiseen.

Välikaarihitsaus on välimuoto kuumakaari- ja lyhytkaarihitsausten väliltä. Siinä lisäainetta siirtyy suurina pisaroina oikosulkujen aikana ja suihkuna kaariaikana. Välikaarihitsausta pyritään yleensä välttämään, mutta esimerkiksi vaakahitsauksessa sitä joudutaan käyttämään. (Lepola & Makkonen, 2005, s.115)

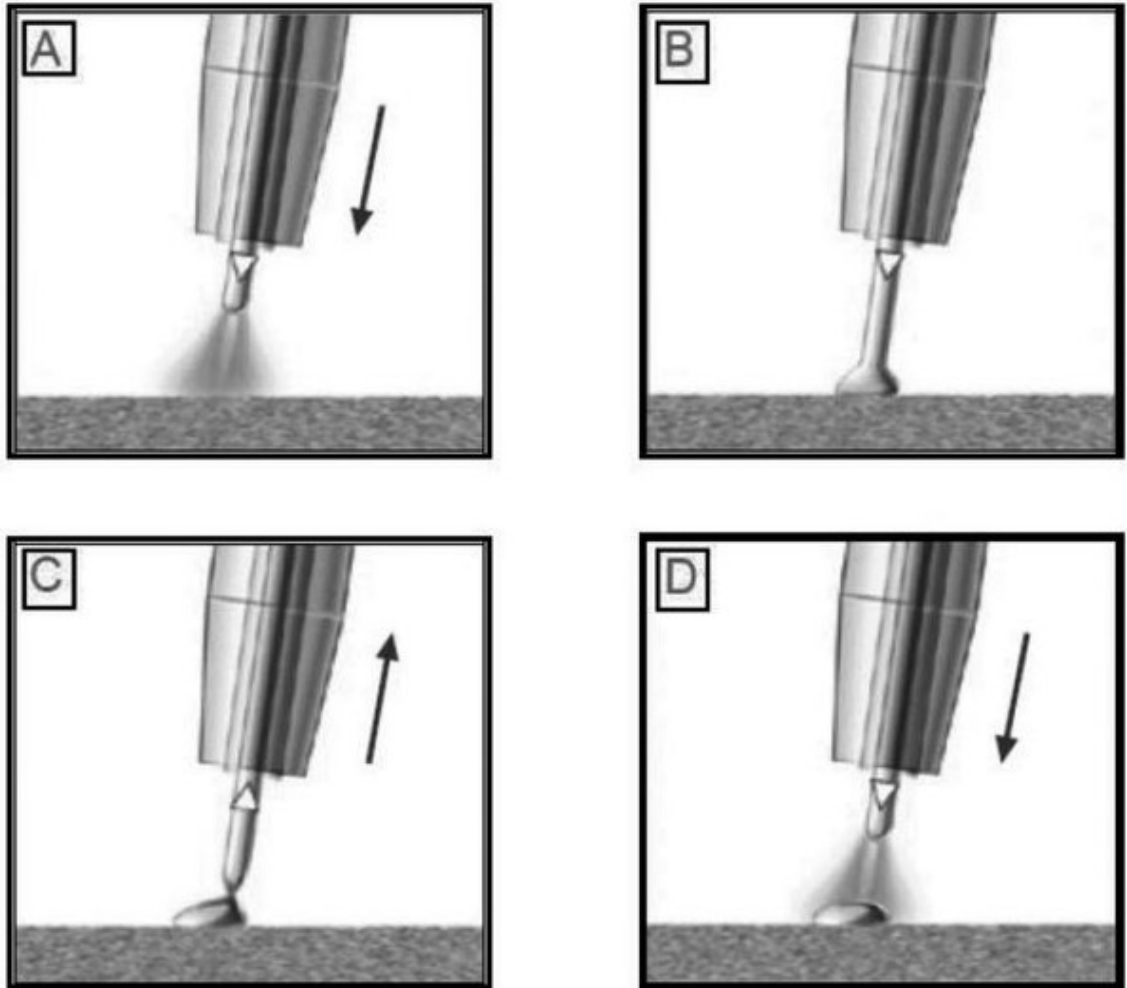
Kuumakaarihitsaus eroaa edellisistä kaaritapahtumista sillä, että sen aikana ei muodostu ollenkaan oikosulkuja, vaan suuri kaariteho irrottaa lisäainelangasta jatkuvasti pieniä pisaroita. Suuri kaariteho aiheuttaa myös suuren sula-alueen, joten kuumakaarihitsaus ei sovellu asentohitsauksiin. Sen yleisiä käyttökohteita ovat paksujen perusaineiden liittämiset.

Pulssikaari on kuumakaaren tavoin oikosuluton kaari, jossa pisara muodostetaan ja irrotetaan lisäainelangasta virtapulssilla. Pisarat siirtyvät suihkuna hitsisulaan. Virtapulssien välissä lisäainelangan kärki ja hitsisula pidetään sulana perusvirralla. Pulssikaaren taajuus on 20–400 Hz. (Lepola & Makkonen, 2005, s.116)

2.1.1 CMT-hitsaus

CMT-hitsaus (Cold metal transfer) on itävaltalaisen Fronius International GmbH:n vuonna 2004 kehittämä hitsausmenetelmä, joka pohjautuu MIG/MAG-hitsaukseen (Fronius Oy, 2012). CMT eroaa edellä mainituista vakaammalla valokaarella, roiskeettomuudella ja pienellä lämmöntuonnilla. CMT-hitsaus on myös helposti robotisoitavissa, joten sillä on tuottavuutta parantava vaikutus.

Menetelmä perustuu kontrolloituun ja tarkkaan lisäaineen liikkeeseen, missä langan syöttösuuntaa vaihdetaan toistuvasti. Valokaaren sulattama lisäainepisara syötetään suoraan sulaan ja lisäaineen takaisinvento irrottaa sen lisäainelangasta. Tämä liike vähentää roiskeiden määrää huomattavasti, koska sula pisara ei joudu siirtymään hitsisulaan pelkästään putoamalla (Fronius Oy, 2012). Kuvassa 1 on esitelty hitsauksen vaiheet.



Kuva 1. CMT-hitsausprosessin vaiheet (Lin & Luo, 2014).

Langan syöttösuunnan vaihdon taajuus vaihtelee yleensä 50 ja 130 Hz:n välillä. Pisaran irrotuksen aikana menetelmä ei käytä virtaa lainkaan, joten lämpöä siirtyy kappaleeseen ainoastaan valokaaren aikana. Tämä vähentää hitsattavien kappaleiden muodonmuutoksia lämmön vaikutuksesta ja mahdollistaa entistä ohuempien levyjen liittämisen toisiinsa (Pronius Oy, 2012). Joidenkin lähteiden mukaan CMT-hitsaus saattaa johtaa myös hitsin parantuneisiin mekaanisiin ominaisuuksiin (Talalaev, et al. 2012).

2.1.2 Kovahitsaus

Kovahitsaus määritellään prosessina, jossa hitsisulaan syötetään perusainetta kovempia partikkeleita kulumisen estämiseksi (Okechukwu, et al. 2018). Tilanteet, joissa esiintyy korroosiota tai kulumista, mutta ei voida käyttää voitelua, ovat usein ratkaistavissa kovahitsauksella. Kovahitsauksella voidaan myös lisätä materiaalia rikkoutuneisiin osiin, jotta ne voidaan palauttaa käyttöön ja näin niiden elinkaarta saadaan jatkettua. Yleisimpiä sovelluskohteita kovahitsaukselle ovat kaivoslaitteisto, murskaimet ja maansiirtokoneet (Okechukwu, et al. 2018).

Kovahitsaus ei ole sidottu vain tiettyyn hitsausmenetelmään, vaan sitä voidaan käyttää kaikilla menetelmillä. Tässä työssä perehdytään kovahitsaukseen CMT-hitsausprosessilla. CMT-laitteistolla pystyy kovahitsaamaan kahdella eri menetelmällä. Ensimmäinen näistä on kaupallinen lisäänelanka, joka sisältää valmiiksi perusainetta kovempia karbidipartikkeleja. Partikkelit päätyvät hitsisulaan luonnollisesti valokaaren kautta, mutta ongelmaksi muodostuu valokaaren lämpötila. Lämpötila saattaa olla huomattavasti yli karbidipartikkelien sulamispisteen, joten osa partikkeleista sulaa ja menettää mekaaniset ominaisuutensa hitsatessa. Tämä johtaa hitsisauman epätasaiseen kulumiskestävyys- ja huonoon ennustettavuuteen.

Toinen kovahitsausmenetelmä CMT-laitteistolla on ulkoinen partikkelisuutin. Partikkelit kulkeutuvat erillisen syöttölaitteiston kautta kantokaasun kuljettamina sulaan. Tällöin valokaaren aikana syötetyt partikkelit saattavat edelleen sulaa, mutta pisaran irrotuksen aikana syötetyt pysyvät kiinteinä. Menetelmän haasteina voidaan pitää kantokaasun vaikutusta suojaakaasun kattavuuteen sekä partikkelisuuttimen suunnittelua. Suuttimen pitäisi ohjata partikkelit mahdollisimman tarkasti sulaan, jotta partikkelien kulutus ja laitteiston käyttökustannukset laskisivat. Suutin ei saisi kuitenkaan aiheuttaa tukoksia, jotka johtaisivat laitteiston käyttökatkoihin.

2.2 Numeerinen virtauslaskenta

Computational fluid dynamics eli CFD-laskenta on numeerinen työkalu virtaus- ja lämmönsiirto-ongelmien ratkaisuun. Se perustuu pääasiassa Navier-Stokesin osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisuun. Näiden yhtälöiden pohjana toimivat taseyhtälöt, joita ovat massan säilyvyyslaki, Newtonin toinen laki ja liikemäärän säilyvyyslaki. Kun Navier–Stokes-yhtälöihin liitetään turbulenssin approksimointiin tarkoitettu turbulenssiyhtälö, voidaan paine- ja nopeuskenttä ratkaista numeerisesti. Yleisin menetelmä näiden ratkaisuun on kontrollitulavuusmenetelmä. Muita ratkaisumenetelmiä ovat muut differenssimenetelmät, elementti- ja spektrimenetelmät. (Versteeg & Malalasekera, 2007, s.9)

2.2.1 Hallitsevat yhtälöt

Massan ja liikemäärän säilyvyyslaki voidaan johtaa tarkastelemalla neste- tai kaasuelementtiä, joka on kuution muotoinen. Kirjallisuudessa (Versteeg & Malalasekera, 2007, s.11) massan säilyvyyden yhtälö esitetään yleensä muodossa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

jossa ρ on kaasun tai nesteen tiheys, t on aika, u on nopeus ja x on paikka karteesisessa koordinaatistossa. Liikemäärän säilyvyys esitetään yleensä muodossa

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}, \quad (2)$$

jossa p on paine ja μ on nesteen tai kaasun dynaaminen viskositeetti. Tätä yhtälöä kutsutaan Navier–Stokes-yhtälöksi. Laminaarin virtauksen laskennassa yhtälöistä (1) ja (2) saadaan ratkaistua yksinkertaisesti paine- ja nopeuskentät. Turbulenttisen virtauksen laskennassa yhtälöiden ratkaiseminen kuluttaisi liikaa resursseja, eikä näin ollen ole käytännöllistä. Yleensä turbulenttisen virtauksen ratkaiseminen aikakeskiarvotettuna riittää ja sitä kuvataan aikakeskiarvotetuilla Navier–Stokes-yhtälöillä, jotka on johdettu yhtälöistä (3) ja (4). (Versteeg & Malalasekera, 2007, s.65)

Massan säilyvyys aikakeskiarvotettuna saadaan muotoon

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

ja liikemäärän säilyvyys muotoon

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j}, \quad (4)$$

jossa u' on nopeuden ajasta riippuva vaihtelu suhteessa keskiarvoon, \bar{u} on nopeuden keskimääräinen arvo ja \bar{p} on paineen keskimääräinen arvo. Yhtälön (4) oikean puolen termin $\overline{\rho u'_i u'_j}$ ratkaisemiseksi tarvitaan turbulenssimalleiksi kutsuttuja puoliempiirisiä malleja (Versteeg & Malalasekera, 2007, s.66). Nämä mallit perustuvat mittauksiin ja simulaatioihin, eivätkä siis toimi kaikissa tapauksissa.

2.2.2 Turbulenssi

Turbulenssi on virtauksessa esiintyvä kolmiulotteinen ilmiö, jonka ominaispiirteitä ovat suuret muutokset virtauksen nopeudessa ja suunnassa ajan suhteen. Turbulenssin synnylle on monia mahdollisia syitä, kuten virtauksen suuri nopeus tai este virtauksessa. (Crowe, et al. 2012, s.199)

Partikkelisuuttimen virtauslaskennassa on tärkeä ottaa huomioon turbulenssin vaikutus, sillä se lisää kaasujen välistä sekoittuvuutta huomattavasti ja vaikuttaa näin ilman argon- sekä hiilidioksidipitoisuuteen. Turbulenssin approksimoimiseksi on kehitetty useita turbulenssimalleja, jotka kuvaavat turbulenttisen virtauksen kehittymistä. Turbulenssimallien ominaisuuksia ovat laskennan raskaus, tarkkuus ja yleispätevyys. Näiden ristiriitaisien ominaisuuksien takia ei voida osoittaa yhtä yleispätevää mallia, vaan jokaisen virtausongelman kohdalla on valittava kyseiseen tilanteeseen parhaiten sopiva malli. Yleisimmin käytetyt turbulenssimallit ovat k- ϵ -malli, realisoituva k- ω -malli sekä k- ω SST -malli. (Anupam, 2011, s.56)

k-ε-malli on hyvin yleinen kahden differentiaaliyhtälön malli, joka on numeerisesti stabiili ja suhteellisen tarkka tietyissä tilanteissa. Yhtälössä turbulenssin kineettinen energia k ratkaistaan turbulenssin dissipaation ε avulla. Turbulenssin dissipaatio ε kuvaa nopeutta, jolla turbulenssi kineettinen energia muuttuu lämmöksi. k-ε-malli ei kuitenkaan sovellu kaikkiin tapauksiin. Esimerkkejä tällaisista tapauksista ovat pyörivät virtaukset, äkilliset suunnanmuutokset virtauksessa ja virtaukset kaarevien pintojen yli. (Crowe, et al. 2012, s.208)

k-ω-malli on k-ε mallin tavoin kahden lisädifferentiaaliyhtälön malli. Mallissa turbulenssin kineettinen energia ratkaistaan ominaisdissipaation ω avulla. Hyötynä verrattuna k-ε-malliin voidaan pitää k-ω-mallin kykyä ennustaa seinämän lähellä tapahtuvaa virtausta. Tämän takia sitä pidetään yleisesti k-ε-mallia tarkempana ja robustimpana. Mallin heikkoutena voidaan pitää sen huonoa kykyä approksimoida vapaita virtauksia. (Crowe, et al. 2012, s.208)

k-ω SST -malli (Shear Stress Model) on yhdistelmä kahdesta edellä esitellystä mallista, joka hyödyntää molempien mallien parhaita puolia saavuttaakseen paremman tarkkuuden. Malli hyödyntää k-ω -mallia rajakerroksissa, koska sillä on kyky ennustaa turbulenssia seinämien lähetyvillä. Kauempana seinämistä malli hyödyntää k-ε-mallia ja sen kykyä ennustaa turbulenssin käytöstä täysin kehittyneessä vapaassa virtauksessa. Näiden päätapausten välissä malli käyttää sekoitusfunktioita, jotka ovat välimuotoja aikaisemmin esitellyistä malleista. (Crowe, et al. 2012, s.208)

Partikkelisuuttimen virtauslaskennassa päätettiin käyttää k-ω SST -mallia sen monikäyttöisyyden takia ja kohtalaisesta tarkkuudesta useimmissa tapauksissa. Työn laajuuden rajaamiseksi ei simulaatioita suoritettu muilla turbulenssimalleilla. Yleisesti tämä olisi kuitenkin hyvin suositeltavaa, sillä virtauksessa saattaa esiintyä ilmiöitä, joita ei tule ajatella mallia valittaessa. Nämä ilmiöt saattavat jäädä huomiotta väärän mallin valinnan takia.

2.2.3 Partikkelit virtauksessa

Partikkeleja sisältävien virtausten numeerisessa virtauslaskennassa suurimman haasteen asettavat virtausten partikkelimäärät, jotka tarvitsevat eri fysiikkamalleja partikkelien määrän mukaan. Partikkelipitoiset virtaukset voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan partikkelien syrjäyttämän tilavuuden suhteen, laihaan, keskitiheään ja tiheään virtaukseen (Darteville, 2003). Luokka määritellään kaavalla

$$\alpha_s = \frac{V_s}{V_{cell}}, \quad (5)$$

jossa α_s on partikkelien suhteellinen määrä kontrollitilavuudessa, V_s partikkelien tilavuus kontrollitilavuudessa ja V_{cell} kontrollitilavuus. Laihan virtauksen raja α_s on alle 10^{-6} . Tällöin on tarpeen ottaa huomioon ainoastaan virtauksen vaikutus partikkeleihin, eli partikkelien liikeradat voidaan laskea yksitellen (one way coupling). Keskitiheän virtauksen alueella, $10^{-6} < \alpha_s < 10^{-3}$, partikkelit syrjäyttävät jo niin suuren osuuden virtauksesta, että on syytä ottaa huomioon myös partikkelien vaikutus virtaukseen (two way coupling). Partikkelien suhteellisen määrän ylittäessä 10^{-3} on huomioitava myös kahden ja useamman partikkelin törmäyksistä aiheutuvat muutokset liikeratoihin (four way coupling). Mitä enemmän partikkeleita on virtauksessa, sitä enemmän näitä törmäyksiä tapahtuu ja virtaus häiriintyy. Viimeinen luokka on tiheä virtaus, jossa $\alpha_s > 0,5$. Tällöin partikkelien välinen kitka kasvaa huomattavasti ja on syytä huomioida laskennassa. (Schellander, 2014, s.4–6)

Partikkelisuuttimen tapauksessa selvitettiin, mihin partikkelivirtauksen luokkaan kyseinen tapaus kuuluu. Laitteiston säätövälinä kantokaasun tilavuusvirralle oli ilmoitettu 2–10 l/m. Karbidipartikkelien massavirta oli 5–50 g/min, yksittäisen partikkelin halkaisija 50–150 μm ja partikkelien tiheys liitteen A taulukon mukainen. Partikkelien suhteellisen tilavuuden arvo α_s laskettiin ääritapauksille ja tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Partikkelivirtauksen ominaisuuksia ääritapauksissa.

	Kantokaasun tilavuusvirta (l/min)	Partikkelien massavirta (g/min)	Partikkelien tiheys (g/cm ³)	Partikkelien suhteellinen tilavuus
Asetus 1	2	50	17,2 (W ₂ C)	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Asetus 2	10	5	3,2 (SiC)	$1,6 \cdot 10^{-4}$

Suhteellisen tilavuuden arvojen asettuessa välille $10^{-4} < \alpha_s < 10^{-3}$ on siis otettava huomioon sekä virtauksen vaikutus partikkeleihin että partikkelien vaikutus virtaukseen. Partikkelien väliset törmäykset ja kitka voidaan kuitenkin jättää huomiotta.

Keskitiheiden partikkelivirtauksien mallintamisessa käytetään yleensä diskreettiä faasimallia (discrete phase model, DPM), joka huomioi yksittäisen partikkelin vaikutuksen virtaukseen ja joka laskee partikkelin liikkeen Newtonin toisen lain avulla.

Useissa tapauksissa on huomattu, että partikkelien törmäykset seiniin vaikuttavat virtaukseen huomattavasti. Seinään törmäävä partikkeli menettää osan nopeudestaan ja aiheuttaa hetkellisesti esteen virtaukselle, jota virtaus pyrkii kiihdyttämään. Suurilla partikkeleilla tämä aiheuttaa painehäviöitä, mutta pienillä partikkeleilla nämä häviöt voidaan jättää huomiotta partikkelien pienten inertioiden vuoksi. Tämän lisäksi törmäykset seinämiin aiheuttava muutoksia partikkelien liikkeen suuntaan ja nopeuteen. Tämän ongel-

man mallintamiseksi on esitelty kaksi mallia, sileille pinnoille tarkoitettu palautumiskerroinmalli (restitution coefficient model) sekä karkean pinnan mallin (Schellander, 2014, s.41–43). Partikkelisuuttimen ollessa 3D-tulostettava osa, jonka pinnankarheus on Ra 0,4–0,6, valitaan virtaussimulaatioihin käytettäväksi palautumiskerroinmalli.

3. SUUTTIMEN NUMEERINEN VIRTAUSLASKENTA

3.1 Geometrian luonti

Tutkimuksen kohteena olevaan Fronius CMT Advanced hitsauslaitteistoon oli suunniteltu partikkelisuutin jo ennen tämän työn aloitusta. Suuttimen suunnittelussa ei ollut kuitenkaan otettu huomioon kantokaasun vaikutusta suojakaasun kattavuuteen, eikä sille ollut suoritettu virtauslaskelmia.

3.1.1 Rajoitukset

Partikkelisuuttimen geometrialla ei ollut juurikaan rajoitteita. Työtä määritellessä päätettiin jättää suuttimen kiinnitys syöttöletkuun huomioimatta ja olettaa, että partikkelien syöttö suuttimelle tapahtuu suoraa putkea pitkin. Putken sisähalkaisijan arvioitiin olevan välillä 3–5 mm.

Suuttimen ulostulon sijaintia määrittäessä tuli ottaa huomioon hitsausprosessin suuri lämmöntuotto ja suuttimen valmistusmateriaalin lämpöshokkien kestävyys. Valokaaren muodostuessa liian lähelle tuodun suuttimen kärki saattaisi muuttua muotoaan, jolloin pienentynyt ulostulo aiheuttaisi todennäköisesti tukoksia partikkelien syötössä. Laskenut partikkelipitoisuus hitsisaumassa johtaisi kappaleen laskeneeseen kulutuskestävyyteen ja mahdolliseen ennen aikaiseen hajoamiseen. CMT-hitsauksessa lämpötila saattaa kohota hetkellisesti 1200°C 8 mm:n päässä hitsisulasta (Wu, et al. 2016), joten suuttimen ulostulon ja hitsisulan minimietäisyydeksi valittiin 10 mm.

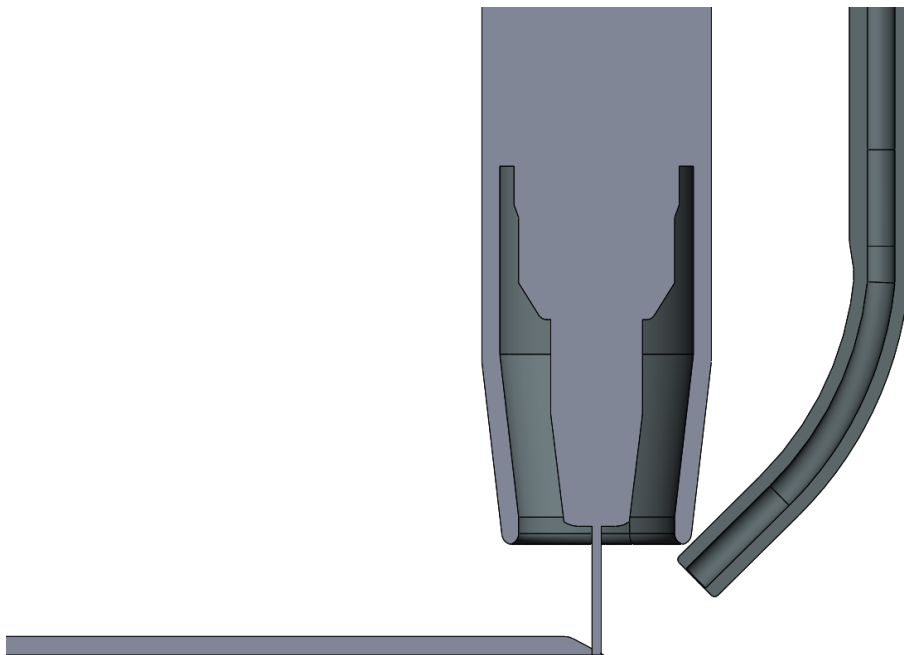
Suutin haluttiin pitää myös mahdollisimman korkealla hitsattavan kappaleen pinnasta mitattuna, jotta matalat olakkeet ja esteet hitsattavan kappaleen pinnalla eivät asettaisi erityisvaatimuksia suuttimen orientaatiolle tai lisäisi riskiä suuttimen osumisesta kappaleeseen. Myös työn pääasiallinen tavoite, partikkelien osuminen hitsisulan alueelle, vaati mahdollisimman suoran linjan suuttimen ulostulon ja hitsisulan välille. Käytännössä suuttimen ulostulo oli siis sijoitettava mahdollisimman lähelle suojakaasusuuttimen reunaa. Minimiarvoksi tälle mitalle valittiin 1 mm.

Viimeisenä rajoitteena suuttimen geometriassa oli sisähalkaisijan paikallinen minimihalkaisija. Koska partikkelien syöttömäärä oli kohtuullisen suuri suhteutettuna suuttimen halkaisijaan, ei suuttimeen voinut suunnitella supistuksia, jotka lisäisivät todennäköisyyttä tukoksille.

3.1.2 3D-mallinnus

Hitsauspolttimen ja partikkelisuuttimen 3D-mallit luotiin SolidWorks 3D CAD-mallinnusohjelmalla. Hitsauspolttimen mallia yksinkertaistettiin poistamalla kahvaosa sekä kaasusuuttimen ulkopuoliset muodot, sillä nämä lisäävät laskenta-aikaa eivätkä ne vaikuta laskennan kannalta oleellisesti lopputulokseen. Malliin lisättiin myös hitsipalko sekä polttimesta hitsattavan materiaalin pintaan saakka yltävä hitsilanka. Näin pyrittiin saavuttamaan mahdollisimman todenmukainen malli yleisimmässä tilanteessa, eli kesken hitsaustapahtumaa. Toisena mahdollisuutena olisi ollut hitsauksen aloitushetki, jolloin hitsipalko jätettäisiin pois mallista. Kyseinen tilanne ei kuitenkaan eroa merkittävästi simuloitusta tilanteesta, sillä hitsipalko ei vaikuta partikkelien hajontaan, ja suojakaasun kattavuuteenkin sillä on lähinnä nimellinen vaikutus johtuen sen matalasta profiilista.

Suuttimessa olevan reikä on vakiokokoinen koko suuttimen matkalta ja sen halkaisija on 3 mm. Suuttimen ulostulo on suunnattu noin 3 mm hitsilangan etupuolelle. Kuvassa 2 on esitetty käytetyn geometrian poikkileikkaus.

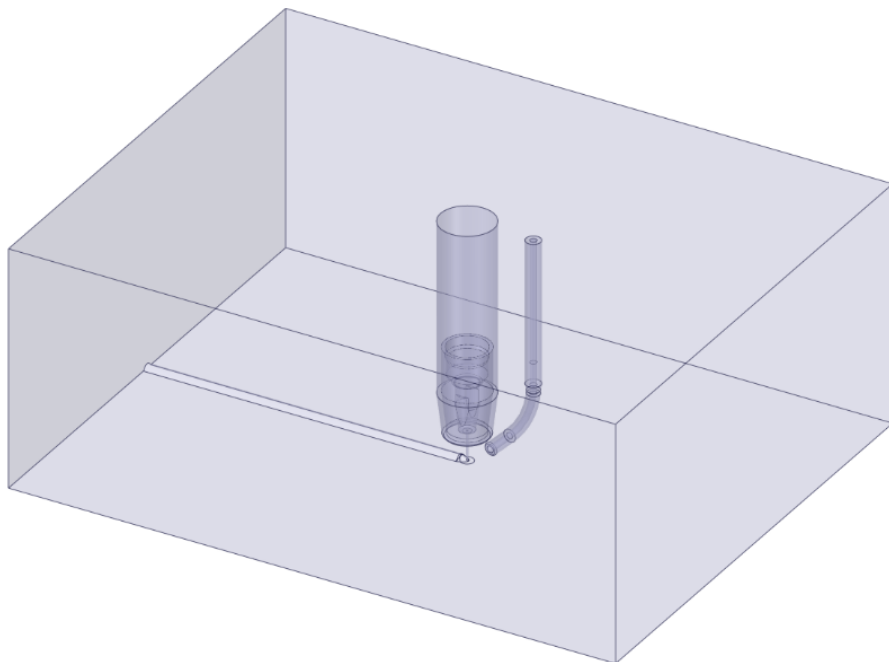


Kuva 2. Virtauslaskennassa käytetty 3D-geometria.

3.2 Mallin valmistelu

Luotu 3D-malli valmistettiin laskentaa varten ANSYS SpaceClaim ohjelmalla. ANSYS SpaceClaim soveltuu tähän käyttöön huomattavasti paremmin kuin SolidWorks, sillä se antaa mahdollisuuden korjata aikaisempia 3D-malleja yksinkertaisilla komennoilla sekä siinä pystyy nimeämään valmiiksi pintoja ja tilavuuksia, mikä helpottaa mallin verkottamista, laskentaa ja tulosten esittämistä (ANSYS, 2019). SpaceClaim kuuluu myös samaan tuoteperheeseen kuin verkotuksessa käytettävä ANSYS Fluent Meshing ja laskennassa sekä tulosten esityksessä käytettävä ANSYS Fluent, eli tiedonsiirto eri ohjelmien välillä on saumatonta ja ongelmia esiintyy hyvin harvoin.

Kuvassa 3 on esitetty mallista luotu nestetilavuuden tilamalli, eli tietyn kokoinen tilavuus, josta poistettiin jo luotu hitsauspolttimen malli. Näin jäljelle jäi vain poltinta ympäröivän kaasun tilavuus, jota pystyy käyttämään sellaisenaan verkotuksessa. Tilamallin pinnat nimettiin niitä vastaavien reunaehtojen mukaan, jolloin Fluent Meshing osaa ehdottaa automaattisesti nimeä vastaavaa reunaehtoita niitä asettaessa. Nimeäminen helpottaa myös tulosten saattamista esityskelpoiseen muotoon, sillä nimettyjä pintoja pystyy esittämään ja piilottamaan sen mukaan mikä on milloinkin havainnollistavin.



Kuva 3. Nestetilavuuden tilamalli ANSYS SpaceClaim ohjelmassa.

3.3 Verkotus

Verkotukseen käytettiin ANSYS Fluent-ohjelman Meshing lisäosaa. Verkkoon lisättiin paikallinen tihennys ellipsin muotoiselle alueelle hitsilangan ympärille niin, että se kattoi osittain myös suojakaasu- ja partikkelisuuttimen. Tiheämmän verkon tarkoituksena on lisätä laskennan tarkkuutta oleellisilla alueilla ilman, että laskenta-aika kasvaa liian pitkäksi. Tihennyksen ja perusverkon välille muodostettavien koppien kasvunopeutta on syytä rajoittaa Growth rate -parametrillä, jotta liian nopea koppikoon kasvu ei vaikuta negatiivisesti laskennan tuloksiin. (ANSYS, 2019)

Koppityyppinä vertailtiin kahta vaihtoehtoa, Poly-hexcore:a ja Polyhedra:a. Näistä ensin mainittu luo nimensä mukaisesti kuution muotoisia laskentakoppeja keskelle suuria tilavuuksia. Näiden koppien tulosten ratkaiseminen on nopeinta kaikista koppityypeistä, ja ne pystyvät ennustamaan virtauksen käyttäytymistä hyvinkin tarkasti silloin, kun virtaus on jonkin kopin pinnan normaalin suuntainen. Lähempänä rajakerroksia käytössä on monikulmaisia koppeja, joissa turbulenssien ennustaminen on tarkempaa. Eräs Poly-hexcore verkon parhaista ominaisuuksista on hyödyntää verkon luonnissa useampaa tietokoneen prosessorin ydintä, jolloin verkon luonti on huomattavasti nopeampaa verrattuna muihin koppityyppeihin, jotka pystyvät hyödyntämään vain yhtä ydintä kerrallaan. (ANSYS, 2019)

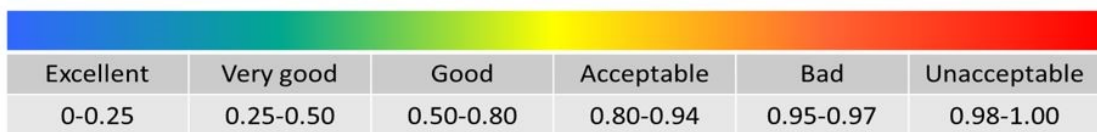
Toinen koppityyppi, Polyhedra, koostuu monitahokkaista, joissa on yli kuusi tahkoa. Nämä satunnaisesti järjestellyt laskentakopit vaativat enemmän laskentaresursseja, mutta ne ovat parempia ennustamaan pyörteisiä virtauksia ja turbulenssia. Hitsauspolttimen tapauksessa voitiin kirjallisuuden perusteella (Nyrenstedt, 2016) olettaa suojakaasun pyörteilevän polttimen ympäristössä, joten Polyhedra valittiin koppityypiksi laskentaan. Verkon luonti kesti Polyhedra:lla noin 15 minuuttia, kun taas Poly-hexcore:lla se vei vain 3 minuuttia. Verkotuksessa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Verkotuksessa käytetyt parametrit.

Parametri	Arvo
Body Of Influence growth rate	1,2
Body Of Influence target mesh size	0,4
Surface mesh minimum size	0,4
Surface mesh maximum size	7
Surface mesh growth rate	1,2
Surface mesh cells per gap	2
Volume mesh number of layers	3
Volume mesh transition ratio	0,272
Volume mesh growth rate	1,2
Volume mesh fill with	polyhedra
Volume mesh max cell length	8,736

Muodostetun verkon laatu vaikuttaa suuresta numeerisen laskennan konvergoitumiseen ja stabiiliuteen. Yleensä virheellisiä tuloksia aiheuttavat esimerkiksi kopit, joiden pituuden ja leveyden suhde on hyvin suuri (ANSYS, 2019). Verkon laatua pystyy arvioimaan Fluent Meshing:ssä kahdella ohjelman ilmoittamalla laatuindikaattorilla, Maximum skewness:llä ja Orthogonal quality:llä. Kuvassa 4 on esitetty ohjelmiston valmistajan ilmoittamat asteikot laatuindikaattoreille. Asteikoiden perusteella laskennalle asetettiin rajoiksi Orthogonal quality 0,2 ja Maximum skewness 0,7

Skewness mesh metrics spectrum:

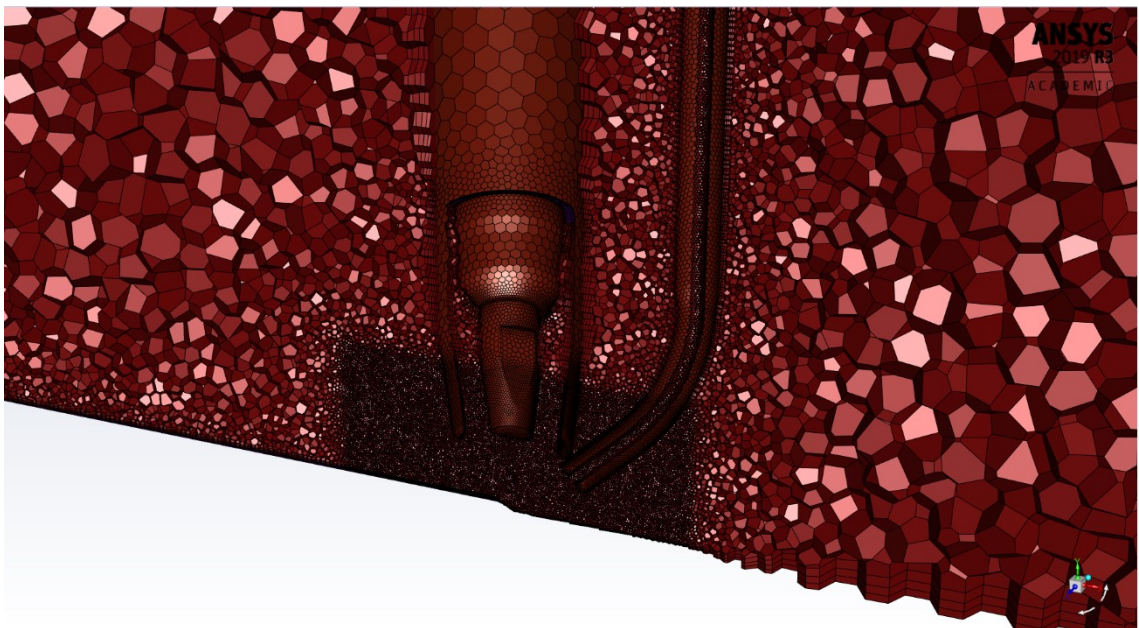


Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:



Kuva 4. Laatuindikaattoreiden asteikot (ANSYS, 2019).

Luotu verkko on esitetty kuvassa 5. Verkossa on 1 050 186 kappaletta, sen Maximum skewness on 0,57 ja Orthogonal quality 0,2.



Kuva 5 Laskennassa käytetyn tilavuusverkon poikkileikkaus

3.4 Laskenta

Laskennassa ja tulosten käsittelyssä käytettiin ANSYS Fluent-ohjelmistoa. Aiemmin muodostettuun verkkoon määritettiin parametrit taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Laskennassa käytetyt parametrit.

Parametri	Arvo
Kantokaasun massavirta	5,45E-5 kg/s
Partikkelien alkunopeus	2,65 m/s
Partikkelien massavirta	8,33E-5 kg/s
Argonin massavirta suojakaasussa	6,70E-4 kg/s
Hiilidioksidin massavirta suojakaasussa	1,61E-4 kg/s
Hitsauspolttimen nopeus	1 m/min
Partikkelien halkaisijoiden vaihteluväli	50–150 μm
Partikkelien tiheys	15,8 g/m ³
Turbulenssimalli	$k-\omega$ SST

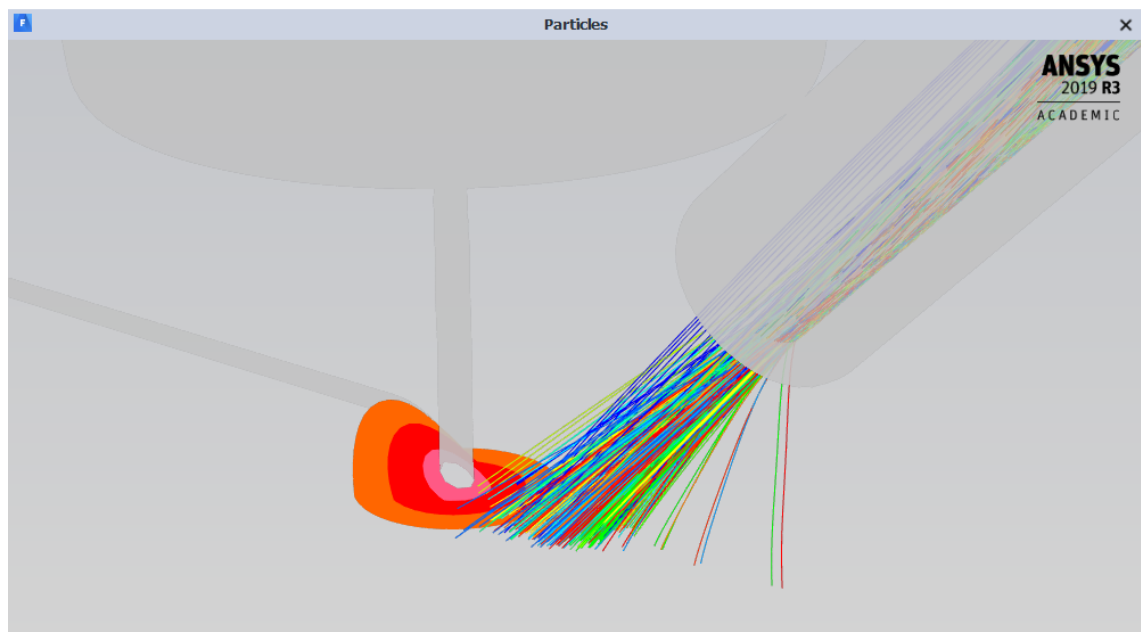
Laskennan kestoksi asetettiin 1 000 iteraatiota, mutta konvergoitumiskriteerit saavutettiin keskimäärin jo 250:n iteraatio jälkeen.

4. TULOKSET

Tässä luvussa on esitelty numeerisen virtauslaskennan tulokset. Luku on jaettu kahteen alalukuun, joista ensimmäisessä esitellään partikkelien hajonta ja toisessa suojavaasun kattavuus hitsisulan ympärillä.

4.1 Partikkelien hajonta

Partikkeleja syötettiin suuttimeen yhteensä 960 kappaletta. Kuvassa 6 on esitetty partikkelien lentorata referenssisuuttimella.



Kuva 4. Karbidipartikkelien lentoradat 3D-tulostetulla suuttimella.

Vaaleanpunainen alue lisääinlangan ympärillä on halkaisijaltaan 2 mm, punainen 4 mm ja oranssi 6 mm. Taulukossa 4 on esitetty partikkelien määrä kullakin alueella.

Taulukko 4. Partikkelien jakauma sulan ympärillä.

	Vaaleanpunainen (Ø 2 mm)	Punainen (Ø 4 mm)	Oranssi (Ø 6 mm)	Yhteensä
Partikkelien määrä (kpl)	5	13	82	100

Simulaation perusteella partikkeleista 10,4% saavuttaa sulan ja vaikuttaa sauman kulumuskestävyyteen. Tällöin lähes 90% partikkeleista menisi hukkaan ja partikkelien kulutus olisi jopa kymmenen kertaa suurempaa kuin tilanteessa, jossa kaikki partikkelit osuisivat

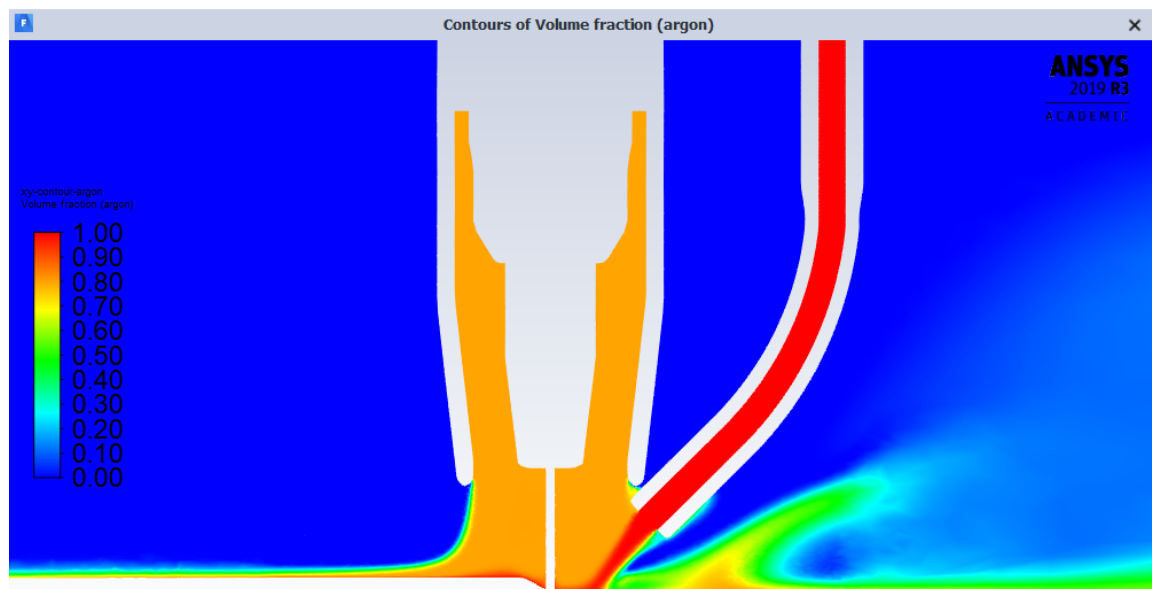
oikealle alueelle. Todellisuudessa osa sulan eteen osuvista partikkeleista kimpoaisi kuitenkin vielä sulaan, mutta tämän simulointi vaatisi liikaa resursseja saavutettavaan hyötyyn nähden.

Hajonnan keskipiste määritettiin noin 3 mm lisäainelangan etupuolelle ja partikkeleista 95% mahtuu 4 mm halkaisijallisen ympyränmuotoisen alueen sisään. Hajontakuvion halkaisija voidaan siis todeta sopivaksi ainakin yli 4 mm leveille hitsisaumoille. Suuttimen suuntausta on kuitenkin muutettava, jotta prosessin taloudellisuus kasvaisi.

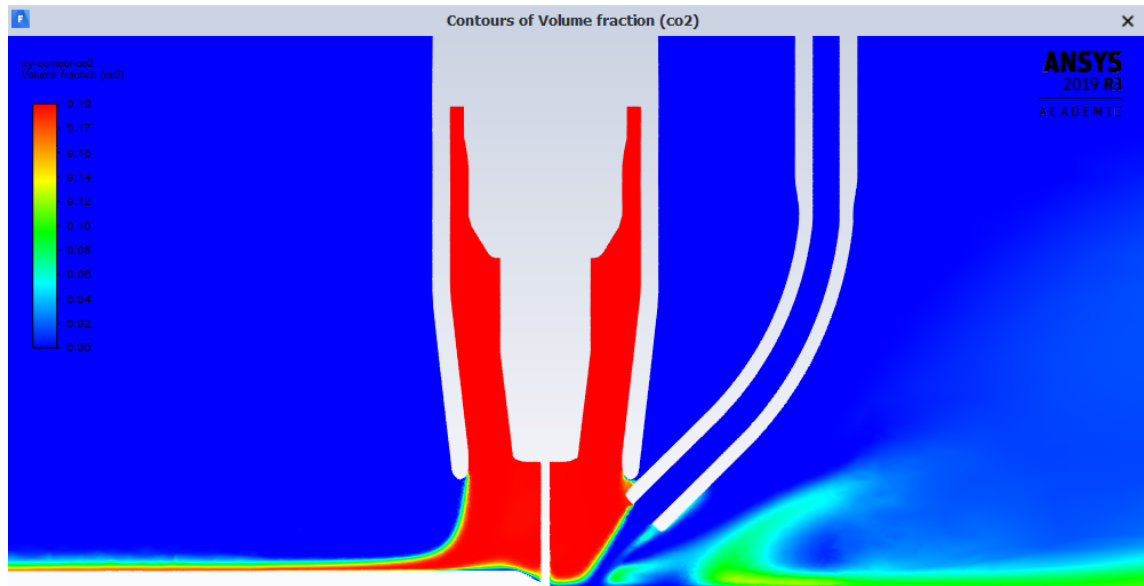
4.2 Suojakaasun kattavuus

Simulaatiossa käytettiin suojakaasuna MISON 18-suojakaasua, joka sisältää 18% hiilidioksidia ja 82% argonia. Suojakaasun tilavuusvirta oli 30 l/min ja se oletettiin täysin sekoittuneeksi sisääntulopinnalla. Kantokaasuna käytettiin 100-prosenttista argonia, jonka tilavuusvirta oli 2 l/min.

Kuvassa 5 on esitetty argonpitoisuus hitsaussuunnan suuntaisella poikkileikkaustasolla eli XY-tasolla. Kuvasta voidaan huomata partikkelien kantokaasun vaikutus lisäainelangan ympärillä, joka johtaa kasvaneeseen argonpitoisuuteen ja mahdollisesti muuttuneisiin hitsisauman ominaisuuksiin. Kuvasta 6 voidaan huomata sama ilmiö selvemmin. Kantokaasun suurempi virtausnopeus verrattuna suojakaasuun saa sen tunkeutumaan liian pitkälle suojakaasuun.

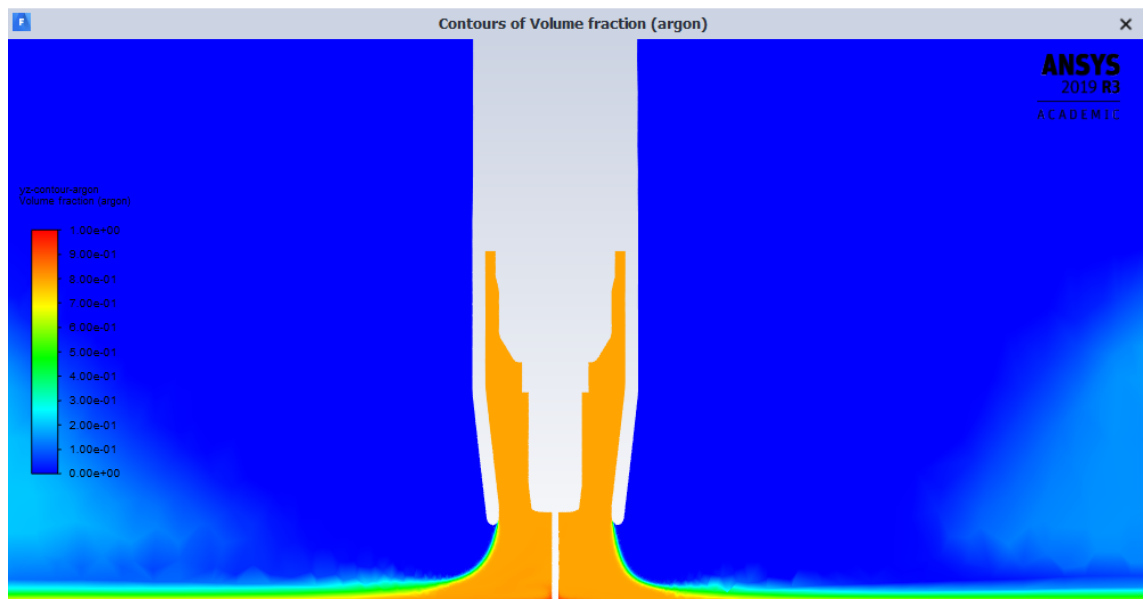


Kuva 5. Argonpitoisuus liikkeen suuntaisella poikkileikkaustasolla.



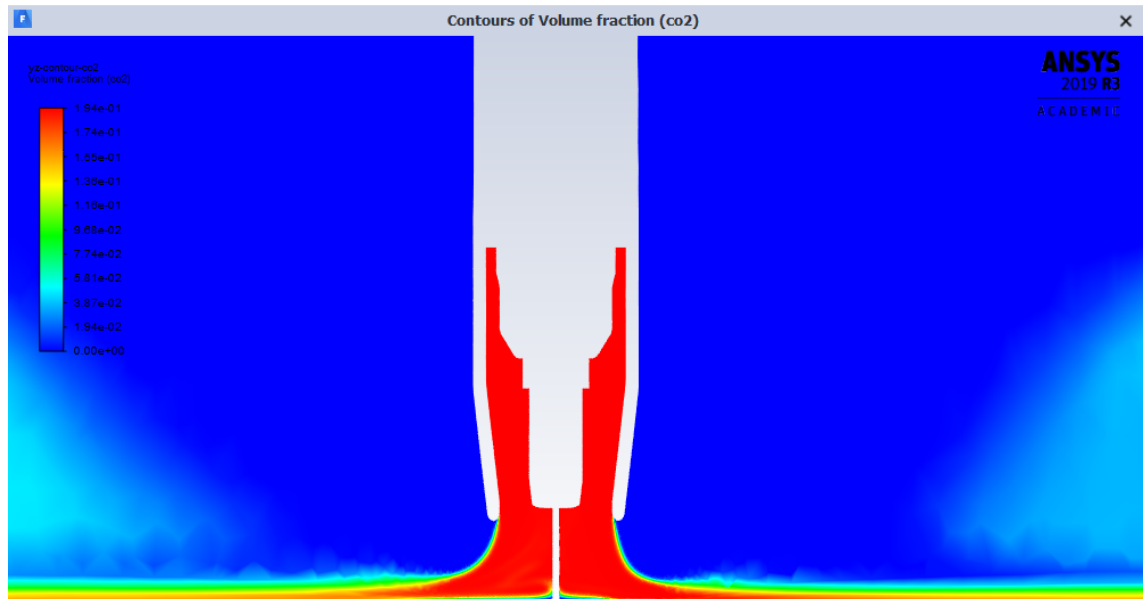
Kuva 6. Hiilidioksidipitoisuus liikkeen suuntaisella poikkileikkaustasolla.

Virtausta tarkasteltiin myös hitsaussuuntaa kohtisuoralla tasolla. Kuvassa 7 on esitelty argonpitoisuus kyseisellä tasolla.



Kuva 7. Argonpitoisuus YZ-tasolla.

Kuvasta voidaan nähdä huomattavasti XY-tasoa matalampi kerros argonia lisäainelangan ympäristössä. Tämä johtuu pääosin suuttimen suuntauksesta, joka on XY-tason suuntainen. Argonvirtaus ei pääse leviämään YZ-tason suuntaan ympäröivän suojakaasun takia. Kuvassa 8 on esitetty hiilidioksidipitoisuus samalla tasolla.



Kuva 8. Hiilidioksidipitoisuus YZ-tasolla.

5. PARANNUSEHDOTUKSET

Luvussa viisi esitellään muutosehdotuksia partikkelisuuttimelle. Parannusehdotukset on jaettu kahteen alalukuun; partikkelien jakaumaan vaikuttaviin muutoksiin ja suojakaasun kattavuuteen vaikuttaviin muutoksiin.

5.1 Partikkelit

Simulaatiotulosten perusteella suutin toimii käyttökohtessaan huonosti ja geometriaa olisi suositeltavaa muokata. Suuttimen ulostulo kannattaisi suunnata niin, että ensimmäiset partikkelit osuisivat aivan sulan etureunaan. Tällöin voitaisiin olettaa paras mahdollinen karbidipartikkelipitoisuus saumalle.

Partikkelien hajonnan osalta suutin toimii hyvin vähintään 4 mm leveille hitsisaumoille. Pienempiä saumoja hitsatessa hukkaan menevien partikkelien määrä on kuitenkin suurempi ja prosessin taloudellisuus kärsii. Eräänä ratkaisuna voisi olla suuttimen ulostulon supistaminen 2 mm halkaisijaan. Tämä luonnollisesti pienentäisi hajontaa, mutta samaan aikaan kasvattaisi tukoksen todennäköisyyttä. Uusi suutin pitäisikin validoida käytännössä syöttämällä sen läpi partikkeleja, jotta saataisiin luotua riippuvuus kantokaasun tilavuusvirran ja partikkelien massavirran suhteen ja tukosherkkyyden välille.

5.2 Suojakaasu

Simulaatioissa huomattiin kantokaasun ympäröivän sulaa jokaisesta suunnasta, mikä ei ole tavoiteltu tilanne, sillä 100-prosenttinen argonpitoisuus vaikuttaa hitsausprosessiin negatiivisesti. Yksinkertaisimpana vaihtoehtona olisi vaihtaa kantokaasu argonista samaksi kaasuksi kuin mitä suojakaasuna käytetään. Tällöin kaasun käyttökustannukset pysyisivät ennallaan, mutta argonin sekoittumista ei tarvitsisi huomioida suuttimen suunnittelussa. Ongelmaksi muodostuu partikkelien annostelulaite, jonka valmistaja on ilmoittanut käytettäväksi kantokaasuksi 100%:n argonin. Valmistajalta pitäisi valmistaa, onko MISON:in käytölle mitään estettä. Mikäli esteitä ei ole, olisi suositeltua vaihtaa kantokaasu argonista MISON:iin.

Mikäli MISON:ia ei pystytä käyttämään kantokaasuna, on seuraavaksi pyrittävä vähentämään kantokaasun tilavuusvirtaa tai ohjaamaan kaasu pois sulan ympäriltä. Tilavuusvirran vähentäminen on näistä vaihtoehdoista vaikeampi toteuttaa, sillä simulaatioissa käytetty 2 l/min on syöttölaitteen alin arvo. Pienempi tilavuusvirta vaikuttaisi myös partikkelien nopeuteen ja siten mahdollisesti tunkeumaan hitsisulassa.

Geometrian muokkaus on vaihtoehtoista työläin, sillä se vaatii virtauslaskennan suorittamisen uudelleen. Suuttimeen voitaisiin tehdä esimerkiksi poistoreikiä kantokaasulle kohtiin, joissa partikkeleja ei kulje tai niitä kulkee vain vähän. Tällainen kohta on esimerkiksi suuttimen kaarteiden sisäpinnassa.

6. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää CMT Advanced -hitsauslaitteiston partikkelisuuttimen toiminta numeerista virtauslaskentaa hyödyntäen. Virtauslaskennan tuloksien perusteella oli tarkoitus esittää mahdollisia muutosehdotuksia suuttimelle paremman toiminnan takaamiseksi.

ANSYS Fluent:lla luotu malli luotiin todellisen hitsaustilanteen perusteella, käyttäen todellisia lähtöarvoja ja reunaehtoja. Malli osoittautui helposti muokattavaksi ja toimivaksi virtauslaskentaan.

Tulokset osoittivat selviä puutteita suuttimen toiminnassa. Partikkelien hajonta oli hyväksyttävästi halkaisijaltaan noin 4 mm, mutta hajontakuvion keskipiste oli 3 mm liian edessä. Tämän takia vain 10,4% partikkeleista osui halutulle alueelle. Myös suojakaasun kattavuudessa huomattiin puutteita. Pienihalkaisijaisesta suuttimesta virtaava kantokaasu pyrki jatkamaan liikettään sulaan saakka, jolloin haluttu argonin ja hiilidioksidin suhde muuttui radikaalisti. Kyseinen ilmiö oli havaittavissa etenkin juuri sulan ympärillä, jossa kaasuseoksella on suurin merkitys.

Suuttimen toiminnan parantamiseksi ehdotettiin useita parannuksia, joista tärkeimpiä olivat suuttimen suuntauksen säätäminen virtauslaskennan tuloksien perusteella niin, että partikkelien hajontakuvion keskipiste olisi keskellä hitsisulaa. Toinen kriittinen ehdotus oli kantokaasun vaihto argonista MISON:iin, mikäli kantokaasulaitteiston valmistaja hyväksyy sen. Muussa tapauksessa on suuttimen geometriaa muutetta ja ylimääräisen argonin määrää vähennettävä muilla keinoin.

Työssä luotua simulaatiomallia on mahdollista hyödyntää tulevaisuudessa uusien suuttimien virtauslaskennassa. Mallin hyödyntäminen ei rajoitu vain CMT-hitsaukseen, vaan sitä voidaan hyödyntää myös MIG- ja MAG-hitsausprosesseissa.

LÄHTEET

ANSYS, 2019. Fluent User's Guide, s.l.: ANSYS, Inc.

Anupam, D., 2011. Tackling Turbulent Flows in Engineering. New Delhi: Springer, Berlin, Heidelberg.

Crowe, C.T., Schwarzkopf, J.D., Sommerfeld, M. & Tsuji, Y., 2012. Multiphase flows with droplets and particles. Florida: CRC Press.

Darteville, S., 2003. Numerical and Granulometric Approaches to Geophysical Granular Flows, Michigan: Michigan Technological University.

Lepola, P. & Makkonen, M., 2005. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. 1. painos toim. Porvoo: WSOY.

Lin, W. & Luo, H., 2014. Handbook of Manufacturing Engineering and Technology. London: Springer.

Nyrenstedt, G., 2016. CFD Study of Welding Fume Behaviour, Lund: Lund University, Department of Energy Sciences.

Okechukwu, C. ym., 2018. Development of hardfaced crusher jaws using ferro-alloy, Akure: Jurnal Tribologi.

Pronius Oy, 2012. [Online]
Saativissa: http://pronius.fi/uploads/Esite_CMT_FIN.pdf. Viitattu 5.4.2020.

Schellander, D., 2014. CFD simulations of particle laden flows: Particle transport and separation. Hamburg: Anchor Academic Publishing.

Talalaev, R., Veinthal, R., Laansoo, A. & Sarkans, M., 2012. Cold metal transfer (CMT) welding of thin sheet metal products, Tallinn: Estonian Journal of Engineering.

Versteeg, H. K. & Malalasekera, W., 2007. An introduction to computational fluid dynamics. 2nd ed. toim. Harlow: Pearson Education Limited.

Wu, K., He, Z., Dong, Z. & Lan, Y., 2016. Numerical simulation of the temperature field of cold metal transfer welding pool. MECHANIKA, 4(Volume 22), pp. 285 - 290.

LIITE A:

	WC	W₂C	VC	Cr₃C₂	TiC	SiC	TiB₂
<i>Density (g/cm³)</i>	15.8	17.2	5.7	6.7	4.9	3.2	4.5
<i>T_m (°C)</i>	2870	2730	2830	1810	3067	2545	2980
<i>Mean CTE x 10⁻⁶ (1/K)</i>	4.2		6.2	7.9	6.4	3.3	6.8
<i>Thermal conductivity (W/m·K)</i>	63		39	19	21	41-145	24
<i>E (GPa)</i>	670		430	372	460	475	522
<i>Specific heat (J/kg·K)</i>	179		531	546	557	669	625
<i>Electrical resistivity (μΩ·cm)</i>	22		60	75	68	> 1500	12
<i>Hardness (GPa)</i>	22		27	14	32	26	30
<i>Crystal structure</i>	hexagonal	hcp	fcc	orthorhombic	fcc	fcc hcp	hcp