

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kone- ja tuotantotekniikka

Matti Pölönen

MIM-KAPPALEEN RUISKUVALETTAVUUDEN PARANTAMINEN

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2017



OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2017
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Karjalankatu 3
80230 JOENSUU
013 260 600

Tekijä
Matti Pölönen

Nimeke
MIM-kappaleen ruiskuvalettavuuden parantaminen

Toimeksiantaja
Karelia-amk

Tiivistelmä

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, kuinka voidaan parantaa MIM-kappaleen ruiskuvalettavuutta. Tavoitteena oli saada selville, mitä vaatimuksia metalliruiskuvalu asettaa prosessin eri vaiheille ja mitä muotissa tulisi ottaa huomioon. Työ toteutettiin Karelia-ammattikorkeakoulun toimeksiannosta.

Työssä tutustuttiin MIM-prosessin eri vaiheisiin. Tarkastelunäkökulmaksi valittiin se, kuinka metalliruiskuvalu poikkeaa muoviruiskuvalusta. Työn kokeellisessa osiossa käytettiin Karelia-ammattikorkeakoulun testimuottia, jolla tehtiin ruiskuvalukokeita. Ruiskuvalukokeiden tulosten pohjalta testimuottiin suunniteltiin modifikaatio.

Työn kokeellisen osion tuloksena saatiin tietoa ja ymmärrystä siitä, että metalliruiskuvalu poikkeaa huomattavasti muoviruiskuvalusta. Ruiskuvalukokeissa havaittiin, että MIM-materiaaleilla ilmenee herkemmin jettingiä kuin muovimateriaaleilla. Jetting-ongelmaa yritettiin poistaa tekemällä ruiskuvaluparametri muutoksia, mutta niistä ei ollut apua. Tulokset herättävät ajattelemaan, että kun suunnitellaan MIM-tuotetta ja MIM-tuotteelle muottia, on tärkeää miettiä, mistä kappaletta lähdetään ruiskuttamaan ja mitä vaikutuksia valinnalla on tuotteen täyttymiseen ja valmiiseen tuotteeseen. Kokeellisen osion lopussa on esitelty parannusehdotus testimuotille. Ehdotuksessa portin suuntaus on käännetty kohti kappaleen seinämää, jottei ruiskutus tapahdu tyhjään tilaan.

Kieli

suomi

Sivuja 46

Liitteet 5

Asiasanat

MIM, metalliruiskuvalu, sideaineen poisto, sintraus



THESIS
March 2017
**Degree Programme in Mechanical and
Production Engineering**
Karjalankatu 3
80230 JOENSUU
FINLAND
+358 13 260 600

Author
Matti Pölönen

Title
Improving the Quality of MIM Parts

Commissioned by
KUAS

Abstract

The purpose of this thesis was to study how to improve the quality of MIM parts. The goal was to find out what kind of requirements MIM sets for different process steps and what should be considered for tooling. The assignment was given by Karelia University of Applied Sciences.

In this thesis, different steps of the MIM process are explored. The point of view is how MIM differs from plastic injection moulding. In the practical section of the thesis cavity filling series were made with a test mould of KUAS. By analysing the results of the cavity filling series, the modification was designed for the test mould.

In the practical section, more information and understanding was gained about how the metal injection moulding differs from the plastic injection moulding. The results draw attention to the importance of the gate location and what are the consequences of it in the finished part. Finally in the practical section a new modification design for the test mould is introduced. In the new design the gate is located so that the melt flow hits the wall after the gate.

Language

Finnish

Pages 46

Appendices 5

Keywords

MIM, metal injection moulding, debinding, sintering

Sisältö

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenne- ja käsiteluettelo

1	Johdanto	6
1.1	MIM-projekti	6
1.2	Tutkimusongelma ja työn tavoitteet	6
2	MIM-prosessi	8
3	MIM-kappaleen laatuun vaikuttavia tekijöitä	9
3.1	Materiaalit	9
3.2	Sideaineet	11
3.3	Ruiskuvaluprosessi	12
3.4	Muottitekniikka	16
3.4.1	Metalliruiskuvalumuotit	16
3.4.2	Muottikutistuma	16
3.4.3	Portti ja kanavisto	17
3.5	Sideaineen poisto	17
3.5.1	Sideaineen poisto polttamalla	18
3.5.2	Katalyyttinen sideaineen poisto	18
3.5.3	Sideaineen poisto vedessä liuottamalla	18
3.6	Sintraus	19
3.6.1	Sintrauslaitteisto	19
3.6.2	Sintraussykli	20
3.7	Metalliruiskuvalun simulointi	20
4	Testimuotin toimivuus MIM-muottina	22
4.1	Testisuunnitelma	22
4.2	Testimuotin esittely	22
4.3	Täyttymisanalyysi simuloinnilla	26
4.4	Täyttymisanalyysin kokeellinen toteutus	27
5	Tulokset	28
5.1	Simuloinnin tulokset	28
5.2	Polystyreenistä ruiskuvaletut täyttymissarjat	29
5.3	PolyMIM 316L:stä ruiskuvaletut täyttymissarjat	31
5.4	PolyMIM 8620:stä ruiskuvaletut täyttymissarjat	33
5.5	Ruiskutusnopeuden vaikutus muottipesän täyttymiseen	35
6	Johtopäätökset	37
7	Testimuotin modifiointi	38
8	Pohdinta	41
8.1	Opinnäytetyönaihe ja opinnäytetyö prosessin kulku	41
8.2	Tulosten hyödynnettävyys	43
8.3	Käytännön ongelmia ja uudet tutkimuskohteet	44
8.4	Oma oppiminen	45
	Lähteet	46
	Liitteet	

Lyhenne- ja käsiteluettelo

CAD (Computer-aided Design) Tietokoneavusteinen suunnittelu

CFD (Computational Fluid Dynamics) Numeerinen virtausdynamiikka: Numeerinen menetelmä nesteiden ja kaasujen käyttäytymisien analysointiin

FDM (Finite Difference Method) Äärellinen erotus menetelmä

FEM (Finite Element Method) Äärellinen elementti menetelmä

FVM (Finite Volume Method) Äärellinen tilavuus menetelmä

MIM (Metal Injection Molding) Metalliruiskuvalu

1 Johdanto

1.1 MIM-projekti

Karelia-ammattikorkeakoulu ja sen yhteistyökumppanit ovat kiinnostuneita metalliruiskuvaluteknologiasta ja sen tarjoamista uusista mahdollisuuksista pienten metalliosien valmistukseen. Tämän kiinnostuksen pohjalta oli käynnistetty kaksi hanketta, joiden päärahoittajana on Pohjois-Karjalan maakuntaliitto. Hankkeissa on tarkoituksena saada käytännön tietotaitoa ja selvittää metalliruiskuvalun mahdollisuuksia paikallisten yritysten tarpeisiin. [1.]

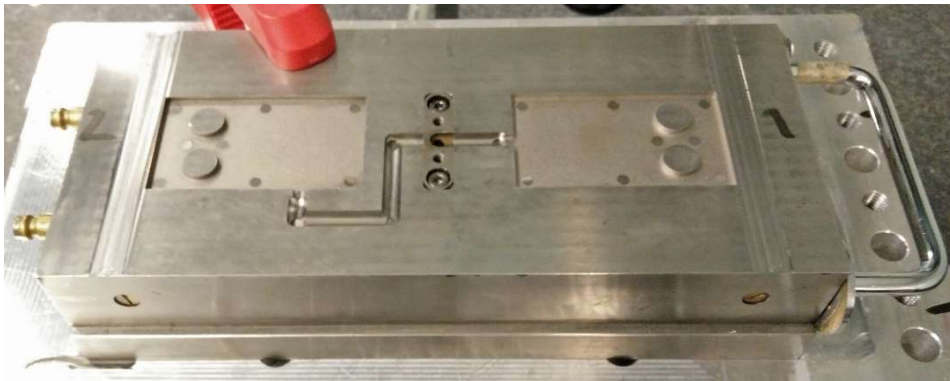
Hankkeiden puitteissa on tarkoitus tehdä muun muassa opinnäytetöitä, protokappaleita ja prototyökaluja. Tavoitteena on ottaa ensi alkuun kokoluokaltaan sopivia tuotannossa olevia tuotteita, joita on valmistettu muilla valmistusmenetelmillä, esimerkiksi koneistamalla. Tuotteeseen tehdään tarvittavat muutokset, jotta se toimii ruiskuvalutuotteena kuitenkin säilyttäen tuotteen toiminnallisuuden ja spesifikaatiot.

Käytännön osaamisen kartuttamisen mahdollistaa rinnalla oleva investointihanke, jossa rakennetaan demonstraatioympäristö metalliruiskuvalukokeiluja varten. Demonstraatioympäristöön investoidaan pilottikäyttöön tarkoitettu moderni sintrausuuni lisälaitteineen. [2.] Sintrausuunin asennukset ja ylösajo alkoivat syksyn 2016 aikana. Demonstraatioympäristö tulee jatkoksi jo olemassa olevan Karelia-ammattikorkeakoulun tarkkuustekniikan laboratorion osaamisketjua ja laitteistoja. Tarkkuustekniikan laboratorion ja Karelian yhteistyöverkolla on kokemusta, tekijät ja välineet ruiskuvalumuottien valmistukseen. Tämä mahdollistaa erilaisten kokeilujen, korjausten ja muutosten tekemisen hyvin nopealla aikataululla.

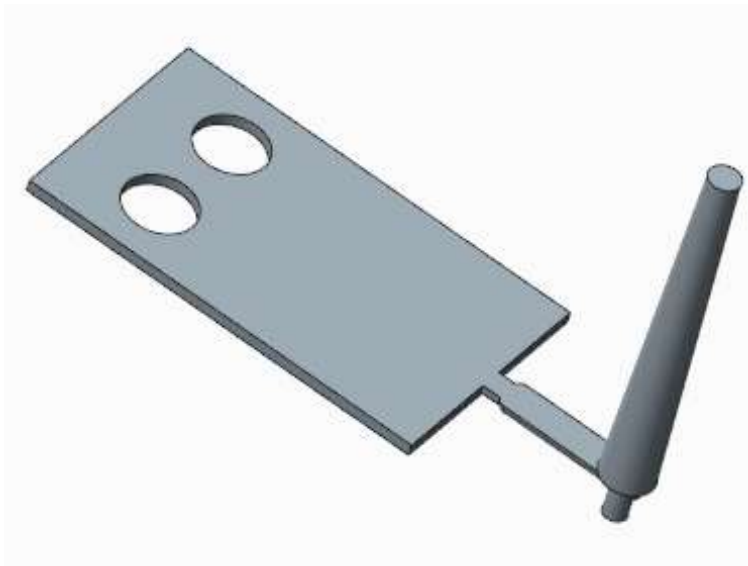
1.2 Tutkimusongelma ja työn tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, kuinka voidaan parantaa MIM-kappaleen ruiskuvaltavuutta. Tutkimuksen tarkastelu näkökulmaksi valittiin, kuinka metalliruiskuvalu poikkeaa muoviruiskuvalusta. Teoriaosan tarkoituksena on selvittää, mitä vaatimuksia metalliruiskuvalu asettaa prosessin eri vaiheille ja muotille. Tutkimuksen kokeellisessa osiossa käytettiin Karelia-ammattikorkeakoulun kasettimuottia (kuviot 1 ja 2), jolla

tehtiin ruiskuvalukokeita. Ruiskuvalukokeiden tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin kasettimuotti toimii MIM-materiaaleilla. Ruiskuvalukokeiden tulosten perusteella arvioidaan, miten hyvin muotti toimii MIM-materiaaleilla. Jos muotti ei toimi sellaisenaan MIM-materiaaleilla, niin mietitään, miten muotin toimintaa voidaan parantaa. Ruiskuvalukokeiden tarkoituksena on kerätä tietoa ja käytännön kokemusta siitä, mitä tulisi ottaa huomioon metalliruiskuvalussa. Opittuja tietoja ja kokemuksia voidaan hyödyntää suunnitelluissa uusissa MIM-muotteja ja tuotteita.



Kuvio 1. Ruiskuvalukokeissa käytetyn kasettimuotin tuotekasetti



Kuvio 2. Ruiskuvalukokeissa käytetyn tuotteen CAD-malli

2 MIM-prosessi

Metalliruiskuvalu (MIM) on prosessi, jossa muovataan ja sintrataan metallijauheesta kappaleita. Metalliruiskuvalua käytetään monimutkaisten metallikappaleiden massavalmistukseen. MIM-prosessilla tehtyjen kappaleiden mekaaniset ominaisuudet ovat lähestulkoon samanlaiset kuin esimerkiksi koneistamalla tehdyillä kappaleilla. [3, s. 1]. Kuviossa 3 on esitelty MIM-prosessin vaiheet.



Kuvio 3. MIM-prosessin vaiheet [25, muokattu 20.7.2016 MP].

MIM-prosessi alkaa sillä, että metallijauhe sekoitetaan sideaineeseen ja seos granuloidaan syötettäväksi materiaaliksi ruiskuvaluprosessiin. Sideaine toimii kantoaineena metallijauheelle, jotta se saadaan ruiskuvalettua.

Seoksesta tehdystä materiaalista valetaan kappaleita ruiskuvalukoneella. Ruiskuvalussa materiaali annostellaan juoksevaan muotoon ja tämä sula massa työnnetään muottiin, jossa kappale saa muotonsa. Näitä ruiskuvalettuja kappaleita kutsutaan vihreiksi kappaleiksi.

Seuraavassa vaiheessa vihreistä kappaleista poistetaan suurin osa sideaineesta. Sideainepoistettua kappaletta kutsutaan ruskeaksi kappaleeksi. Sideaineen poistoon on muutama eri tapa riippuen siitä, mikä materiaali on käytössä.

Sideainepoistettu ruskea kappale sintrataan sitä varten tehdyssä uunissa. Materiaalista riippuen säädetään lämpötila, lämpötilaprofiilit, sintrausatmosfääri ja tarvittaessa vaakuumi. Sintrauslämpötila on metallin sulamispisteen alapuolella [4]. Sintrauksen alussa kappaleessa jäljellä oleva sideaine eli backbone poltetaan ensin pois alemmassa lämpötilassa kuin mitä itse sintrauksessa käytetään.

Onnistuneen sintrauksen jälkeen tuloksena pitäisi olla valmis metallikappale. Valmista kappaletta voidaan vielä jatkokäsitellä tarvittaessa, muun muassa lämpökäsittelemällä, pinnoittamalla ja koneistamalla.

3 MIM-kappaleen laatuun vaikuttavia tekijöitä

3.1 Materiaalit

Metalliruiskuvalulla valmistettavia materiaaleja on useita. Kaikilla materiaaleilla on omat erityispiirteensä ja käyttötarkoituksensa. Metalliruiskuvalussa käytettävät materiaalit ja käyttötarkoitukset ryhmitellään seuraavasti [5, s. 32]:

- ruostumaton teräs:

- käytetään esimerkiksi sairaalatekniikassa, elektroniikassa, urheilutavaroissa, ilmailu- ja avaruustekniikassa sekä kuluttajatuotteissa
- seoksia ja ominaisuuksia:
 - o 17-4PH (lujuus ja lämpökäsiteltävyys)
 - o 316L (korroosionkesto, sitkeä, ei magnetisoidu)
 - o 420 & 440C (kovuus, kulutuksen kesto, lämpökäsiteltävä)
 - o 310 (korroosion- ja lämmönkesto)

- niukkaseosteiset teräkset:

- käytetään rautatavaroissa, laakeroinneissa, liukupinnoilla, kuluttajatuotteissa sekä koneiden osissa
- seoksia ja ominaisuuksia:
 - o 1000- sarja (pintakarkeneva)
 - o 4000- sarja (yleiskäyttöön)
 - o 52100- sarja (korkea kulutuksen kesto)

- työkaluteräkset:

- käytetään puu- ja metallityöstöön tarkoitettujen työkalujen valmistukseen
- seoksia ja ominaisuuksia:

- M2/M4 (kovuus 61–66 HRC)
- T15 (kovuus 63–68 HRC)
- M42 (kovuus 65–70 HRC)
- S7 (kovuus 55–60 HRC)

- titaani:

- käytetään sairaalatekniikassa, ilmailu- ja avaruustekniikassa sekä kuluttajatuotteissa
- seoksia ja ominaisuuksia:
 - Ti (kevyt)
 - Ti-6Al-4V (kevyt ja korkea lujuus)

- kupari:

- käytetään elektroniikka- ja lämmönhallintatuotteissa
- seoksia ja ominaisuuksia:
 - Cu (hyvä lämmön- ja sähkönjohtavuus)
 - W-Cu ja Mo-Cu (hyvä lämmönjohtavuus ja pieni lämpölaajeneminen)

- magneettiset seokset:

- käytetään elektroniikkatuotteissa, solenoideissa, käämeissä ja releissä
- seoksia ja ominaisuuksia:
 - Fe-3%Si (matala hystereesihäviö ja korkea resistiivisyys)
 - Fe-50%Ni (korkea permeabiliteetti ja matala jäännösmagneettisuus)
 - Fe-50%Co (korkein magneettinen saturaatio)

- volframi:

- käytetään militaristisissa tuotteissa, elektroniikkatuotteissa ja urheilutarvikkeissa
- seoksia ja ominaisuuksia:
 - W (korkea tiheys)
 - W raskas seos (korkea tiheys ja iskunsitkeys)

- kovametallit:

- käytetään tuotteissa, jossa syntyy leikkausta ja kulumista.
- seoksia ja ominaisuuksia:
 - WC-5Co (korkeampi kovuus)
 - WC-10Co (korkeampi iskunsitkeys)

- keraamit:

- käytetään kun tarvitaan kulutuksenkestoa: suuttimissa ja holkeissa.
- seoksia ja ominaisuuksia:
 - Alumiinioksidi (yleiskäyttöinen)
 - Zirkoniumoksidi (kova kulutuksen kesto)

3.2 Sideaineet

Sideaineiden tehtävänä on toimia kantoaineena metallipulverille ruiskuvaluprosessissa ja pitää kappaleet koossa jatkokäsittelyä varten. Sideaineelle on paljon vaatimuksia, jotka sen tulisi täyttää. Sen täytyy toimia yhteistyössä suurten metalli- ja keraamipulveripitoisuuksien kanssa. Tyypillisesti pulveria on 60 % tilavuudesta. Pulverin ja sideaineen täytyy muodostaa yhtenevä massa, joka voidaan plastisoida ja ruiskuvalaa. Sideaineen tulee olla poistettavissa nopeasti ja ympäristöä vahingoittamatta. Lisäksi sideaineella tulisi olla yhdenmukaiset materiaaliominaisuudet eri materiaalierien välillä ja sideaineen tulisi olla edullista. Vihreiden kappaleiden valukanavistojen ja vihreiden hylkykappaleiden pitää olla kierrätettäviä. [6.]

Sideaineet koostuvat useammasta komponentista. Tärkein pääkomponentti on niin sanottu "backbone" eli ensisijaisen sideaineen poiston jälkeensä jäljelle jäävä sideaine, joka on kestumuvia. Backbone pitää kappaleen koossa ensisijaisen sideaineen poiston jälkeen. Backbone-materiaaleina käytetään muun muassa eteenivinyyliaasettaattia (EVA), polyeteeniä (PE), polypropeenaa (PP), polystyreeniä (PS), polyeteeniglykolia (PEG) ja polymetyylimetakrylaattia (PMMA). [7.]

Ensisijainen sideaine on vaha tai vesipohjainen seos. Vahoissa käytetään esimerkiksi parafiinivahaa tai karnaubavahaa pääaineena ja lisäaineena steariinihappoa. Veteen liukenevissa sideaineissa käytetään esimerkiksi agar-pohjaista seosta. [8.] Kaupallisista materiaaleista hyvin harvoin ilmoitetaan, mistä aineosista se koostuu tai missä suhteessa seosaineita on käytetty. Yleensä vain ilmoitetaan, millä prosessilla sideaine on poistettavissa.

Sideaineen tyyppi määrittää sen poistossa käytettävä prosessin:

1. Kun sideaineena käytetään polyeteeniä tai polypropeenaa ja sen kanssa synteettistä tai luonnonvahaa ja steariinihappoa, sideaine poistetaan polttamalla [6].
2. BASF SE:n kehittämä Catamold-sideainejärjestelmä on polyasettaali-pohjainen [6]. Polyasettaali poistetaan kappaleista katalyyttisesti hajottamalla [9].
3. Nesteeseen liukenevat sideaineet, kuten agar, selluloosa ja PEG-PMMA [10], poistetaan liuottamalla [6].

3.3 Ruiskuvaluprosessi

Ruiskuvalukone muodostuu sulkuyksiköstä ja ruiskutusyksiköstä. Sulkuyksikkö hoitaa muotin toiminnan tarvitsemat liikkeet: muotin kiinnimenon, tarvittavan sulkuvoiman tuottamisen, muotin avauksen ja ulostyönnön. Ruiskutusyksikön vastuulla on ruiskutettavan annoksen valmistus (plastisointi), lämmöntuotto, lämmön ylläpito, ruiskutus ja jälkipaineentuotto. Ruiskutusvalun yhteydessä puhutaan usein jaksoajasta. Jaksoaika tarkoittaa sitä aikaa, joka menee yhden jakson tekemiseen. Yksi jakso on seuraava: Muotti sulkeutuu, jonka jälkeen ruiskutetaan plastisoitu annos muottipesään. Ruiskutuksen lopussa, kun kappale on lähestulkoon täynnä, siirrytään jälkipainevaiheeseen. Tämän jälkeen aloitetaan kappaleen jäähdytysvaihe, jonka jälkeen muotti aukaistaan ja kappale työnnetään ulos. Jäädytysvaiheen aikana plastisoidaan uusi annos. Ruiskuvalukoneen ympärillä tarvitaan myös oheislaitteita, kuten temperointilaitteet muotin lämmitykseen, kuivuri materiaalin kuivaamiseen ja mahdollisesti rouhintamyly valukanavistojen ja hylättyjen kappaleiden kierrätykseen. [11.]

Metalliruiskuvalussa ruiskutusyksikkö tulisi mitoittaa niin, että annoksen koko on 20–80 % ruiskutusyksikön sylinterin tilavuudesta. Tilavuuden pitää olla riittävä, jotta annos täyttää pesän täysin ja plastisoitu annos saavuttaa tasaisen lämpötilan. Valinnassa täytyy kuitenkin ottaa myös huomioon käytettävän materiaalin sideaineen herkkyys hajoamiselle. Metalliruiskuvalussa tarvittava sulkuvoiman F (kaava 1) tarve on noin 12–15 MPa muottipesän ja valukanaviston projektiopinta-alaa kohden.

$$F = pA \tag{1}$$

jossa F = sulkuvoima
 p = paine
 A = projektiopinta-ala

Suurimmat erot normaalin ruiskuvalukoneen ja metalliruiskuvalukoneen välillä ovat ruiskutusyksikössä ja koneen ohjauksessa. Ruuvi, ruuvin kärki, sulkurengas ja sylinteri ovat kovan kulutuksen alla, kun MIM-materiaalit hankaavat näitä osia. Tästä johtuen edellä mainittujen osien tulisi olla karkaistuja. Ruiskutusyksikön ruuvin paikoitustarkkuus, jonka koneen ohjaus hoitaa, on tärkeää etenkin pieniä ja mittatarkkoja MIM-kappaleita tehdessä, jotta vaihtelut eri iskujen välillä olisivat hyvin pienet. Ruuvin geometrialle on myös metalliruiskuvaluun suosituksia: ruuvin puristussuhteen tulisi olla 1,7–2,2. [12, s. 112–113.]

Ruiskuvaluprosessiin liittyy monia parametreja. Näistä tärkeimpiä ovat muotti- ja sulalämpötila, ruiskutusnopeus, vaihtopisteen määrittäminen, jälkipaineen suuruus, jälkipaineaika ja jäähdytysaika.

Sulalämpötila on tavallisesti 10–20 °C korkeampi kuin backbone-materiaalin sulamislämpötila. Liian alhainen sulalämpötila aiheuttaa sen, että sula virtaa huonosti ja muodostuu yhtymäsaumoja. Liian alhainen sulalämpötila voi aiheuttaa myös vaihteluita vihreiden kappaleiden massassa. Jos taas sulalämpötila on liian korkea, materiaali kutistuu enemmän ja tämä voi johtaa siihen, että kappaleessa ilmenee murtumia. Korkea sulalämpötila aiheuttaa myös kantoaineen pilaantumista, kuplia ja purseita. Metallipulveri voi erkaantua kantoaineesta ja pakkaantua ruiskutusyksikköön. Tämä ruiskutusyksikköön pakkautunut metallipulveri haittaa sulkurenkaan toimintaa. Muottilämpötila vaikuttaa siihen, kuinka hyvin muottipesä täyttyy ilman virheitä. Liian alhainen muottilämpötila aiheuttaa sen, että pesä ei täyty täysin ja virtausjälkiä voi näkyä. Liian korkea muottilämpötila aiheuttaa kuplia ja purseita. Vaha-polymeeri-sideainejärjestelmässä käytetään sulalämpötilana 150–190 °C ja muottilämpötilana 25–55 °C. Katalyyttisissä sideainejärjestelmissä vastaavasti käytetään sulalämpötilana 200–260 °C ja muottilämpötilana 100–150 °C. [12, s. 118–120.]

Ruiskutusnopeus metalliruiskuvalussa on nopeampi kuin mitä käytettäisiin pelkkää muovia ruiskutettaessa. Ruiskutusnopeus asetetaan siten, että pesä täyttyy hyvin ilman virheitä. Liian hidas ruiskutusnopeus aiheuttaa virtausjälkiä, heikkoja yhtymäsaumoja ja vajaita kappaleita. Liian suuri ruiskutusnopeus aiheuttaa purseita ja virheitä portin ympäristöön, jos sideaine erkanee metallipulverista. Myös ilmanpoisto voi olla ongelma, jos ruiskutusnopeus on liian suuri. [12, s. 120.]

Vaihtopiste tarkoittaa sitä, kun ruiskuvalukone siirtyy ruiskutuksessa nopeusohjauksesta paineohjaukseen. Ensin ruiskutetaan asetetulla nopeudella vaihtopisteeseen, jonka jälkeen aktivoituu asetettu jälkipaine. Ideaalitalanteessa vaihtopiste pyritään määrittämään siten, että muottipesä on täyttynyt noin 98-prosenttisesti. Pesän lopputäytyminen hoidetaan asetetulla jälkipaineella. Jälkipaineen aktivoitumiseen on muutama eri tapa. Yleisin ja käytännöllisin tapa on tehdä vaihto ruuvien kulkeman matkan perusteella. Muita tapoja tehdä vaihto on mm. sulan paineen, ajan tai hydraulipaineen perusteella. Näistä ensimmäinen on kallis ja kahta viimeistä ei suositella käytettävän metalliruiskuvalussa. [12, s. 120–121.]

Jälkipaineen avulla tapahtuu materiaalin pakkaantuminen. Jälkipaineen suuruuteen vaikuttavat käytetty materiaali ja muotti. Jälkipaineaika tulisi määrittää siten, että jälkipaine on päällä niin pitkään, kunnes portti on jähmettynyt. Ajan määrittämiseksi tulisi suorittaa portin jähmettymisen analysointi ("gate freeze study") [13]. Liian pieni jälkipaine ja liian lyhyt jälkipaineaika aiheuttavat aukkoja ja imujälkiä kappaleisiin. Toisaalta liian suuri jälkipaine ja pitkä jälkipaineaika aiheuttavat vääristymiä, portin ympärille virheitä, pursetta ja ylimääräisiä jännityksiä. [12, s. 121.]

Jäähdytysajan tulisi olla niin pitkä, että kappale on tarpeeksi jähmettynyt ennen ulostyöntöä. Vääränpituinen jäähdytysaika voi aiheuttaa sen, että kappale vahingoittuu ulos työntäessä. Liian lyhyt aika aiheuttaa sen, että ulostyöntötapit voivat upota kappaleeseen, tai vääristää kappaletta. Liian pitkä aika voi tehdä sen, että kappale murtuu. [12, s. 122.]

Taulukossa 1 on lueteltu metalliruiskuvalussa tapahtuvia yleisimpiä virheitä, niiden mahdollisia syitä ja kuinka virhettä voidaan mahdollisesti korjata.

Taulukko 1. Yleisiä virheitä metalliruiskuvalussa [14, s. 242–243, muokattu 27.12.2016 MP].

Virhe	Mahdollinen syy	Korjaavat toimenpiteet
Purse	Liian suuri paine muotissa ja muotti pääsee aukeamaan, sulkupinnat eivät ole tarpeeksi tasomaisia, ilmanpoistot liian suuria	Lisää sulkuvoimaa, muotin korjaus, pienempi ruiskutusnopeus ja paine, vaihtopisteen optimointi
Kappale jää kiinni muotin pesään	Liian suuri ruiskutuspaino, tuote ei kutistu tarpeeksi, liian aikainen ulostyöntö, muotin suunnittelu- tai valmistusvirhe	Käytetään pienempää ruiskutusnopeutta ja jälkipainetta, lasketaan muottilämpöä, pidennetään jäähtymisaikaa, poistetaan vastapäästöt, lisätään päästökulmaa, lisätään ulostyöntö pinta-alaa ja vaihdetaan paikkaa, sideaineen vaihto
Imu jäljet	Lämpökutistuminen, alhainen tiheys	Lisätään ruiskutusnopeutta ja jälkipainetta, lasketaan muottilämpöä, kasvatetaan porttia, lisätään ilmanpoistoa, pienennetään nopeutta paksujen seinämien kohdalla
Huokoisuus	Kaasujen aiheuttamat kuplat, materiaali kosteaa	Lisätään jälkipainetta, pienennetään ruiskutusnopeutta, nostetaan muottilämpöä, kasvatetaan portin kokoa, siirretään portti paksuun seinämään
Palojäljet	Materiaalin lämpötila liian korkea	Pienennetään ruiskutusnopeutta ja lasketaan sulalämpöä, kasvatetaan portin kokoa, portin paikan vaihto
Yhtymäsaumat	Sulalämpötila liian alhainen muotissa	Nostetaan ruiskutusnopeutta, muottilämpöä ja sulalämpöä, suurennetaan porttia, lisätään ilmanpoistoa, yli juoksetetaan yhtymäsaumojen lähellä, siirretään porttia, suunnitellaan tuote niin, ettei virtaus jakaudu
Virtausjäljet	Sulalämpötila liian alhainen muotissa	Lisätään ruiskutusnopeutta, nostetaan muotin ja sulan lämpötilaa, kasvatetaan portin kokoa, portin paikan vaihto

3.4 Muottitekniikka

3.4.1 Metalliruiskuvalumuotit

Metalliruiskuvalumuotit ovat pääsääntöisesti hyvin samanlaisia kuin tavanomaiselle muoville tarkoitetut muotit. Muottisuunnittelussa ja niiden valmistuksessa tulee ottaa huomioon, että MIM-materiaali on hyvin haurasta, tarttuu jakosaumoihin ja aiheuttaa kalvoa herkästi. MIM-muottien sulkupintojen täytyy olla tiukempia kuin mitä muoville suunnitelluissa muoteissa on. Muottimateriaalien, jotka ovat kosketuksessa MIM-materiaalin kanssa, tulisi olla kovaa kulutusta kestävää työkaluterästä tai kovametallia. [15, s. 98.] MIM-kappaleisiin tulisi suunnitella tasainen pinta sintrausta varten. Tämä tasainen pinta toimii tukena sintrausvaiheessa. Jos tasaista pintaa ei pystytä kappaleeseen toteuttamaan, joudutaan sintrausvaiheessa kappale tukemaan muuten. Kappaleen seinämänpaksuuden tulisi olla tasainen ja äkillisiä paksuudenmuutoksia tulisi välttää. [5, s. 41.]

3.4.2 Muottikutistuma

Muottikutistuma on todella suuri verrattuna muovimateriaaleihin, 14 – 18 % riippuen siitä, mikä materiaali on käytössä. Suurin osa kutistumasta tapahtuu kappaleen sintrauksessa.

Materiaalin kutistuma δ voidaan laskea kaavalla 2.

$$\delta = \frac{L_0 - L}{L_0} \quad (2)$$

jossa δ = kutistuma
 L_0 = muottipesän mitta
 L = kappaleen mitta

Muottipesän mitoittamisessa ei yleensä kuitenkaan käytetä materiaalin kutistumaa vaan käytetään Z-arvoa, pesän mittojen laajennuskerrointa, joka on muotin mitan L_0 suhde kappaleen mittaan L . Z-arvo voidaan laskea kaavalla 3.

$$Z = \frac{L_0}{L} \quad (3)$$

Tällä Z-arvolla voidaan suoraan kertoa tavoiteltu kappaleen mitta ja saada oikea pesän mitta. [15, s. 98–99.]

3.4.3 Portti ja kanavisto

Portin geometriassa tulisi suosia ympyrämäistä porttia, koska kalvotyypiset porttiratkaisut aiheuttavat suurempaa leikkaantumista [16]. Portti sijoitetaan yleensä kappaleen paksuimpaan kohtaan, jotta jälkipaineen vaikutus olisi mahdollisimman yhdenmukainen kappaleen joka puolella. Epätasainen pakkaantuminen kappaleessa aiheuttaa vääristymiä kappaleessa sideaineen poistossa ja sintrauksessa. Portti tulisi suunnitella niin, että sulavirtaus suuntautuu kohti seinämää. Tällä suuntauksella pystytään estämään jetting eli sulan ”ryntääminen”. [17, s. 38.]

MIM-materiaali on todella kallista, joten valukanaviston tulisi olla mahdollisimman lyhyt, jotta turha hukka vältetään. Lyhyempi kanavisto myös edesauttaa jälkipaineen vaikutusta pesään.

3.5 Sideaineen poisto

Sideaineen poistoon on ainakin kolme erilaista tapaa ja sideaineen poisto tapahtuu kahdessa eri vaiheessa. Ensisijaisessa sideaineen poistossa poistetaan varsinainen sideaine ja sen jälkeen toissijaisessa sideaineen poistossa poistetaan jäljelle jäävä backbone. Käytetty sideaineen tyyppi (luku 3.2) määrittää, millä prosessilla ensisijainen sideaineen poisto tapahtuu. Ensisijaisella sideaineen poistolla on tarkoitus tehdä matalassa lämpötilassa kappaleeseen huokoinen verkosto, joka mahdollistaa backboneen poistumisen toissijaisessa sideaineen poistossa huomattavasti korkeammassa lämpötilassa, jossa metallipartikkelit alkavat muodostaa diffuusiosidoksia [18, s. 134]. Toissijainen sideaineen poisto tapahtuu joko sintrausuunissa polttamalla tai erillisessä backboneen polttoon tarkoitettussa uunissa. Backboneen polttamisesta syntyy paljon likaa, joka ajan saatossa haittaa itse sintrausuunin toimintaa. Kappaletta, jolle on tehty ensisijainen sideaineen poisto, kutsutaan ruskeaksi kappaleeksi. Poistunutta sideaineen määrää voidaan tarkkailla punnitsemalla kappaleet ennen sideaineen poistoa ja sen jälkeen. Tästä laskemalla saadaan painonmuutosprosentti. Materiaalin toimittajat yleensä ilmoittavat tämän muutosprosentin ja tästä voidaan päätellä karkeasti, miten hyvin sideaineen poisto onnistunut.

3.5.1 Sideaineen poisto polttamalla

Ruiskuvalettu vihreä kappale laitetaan uuniin, jota lämmitetään hitaasti. Vahaosa sideaineesta hajoaa ja haihtuu pois kappaleesta matalammassa lämpötilassa ja jäljelle jää vain korkeamman lämpötilan kestävä backbone-materiaali, joka pitää kappaleen koossa. Tyypillinen polttosykli vie 12 tuntia, mukaan laskettuna lämmitys, pitoaika ja jäähdytys. [3, s. 19.]

3.5.2 Katalyyttinen sideaineen poisto

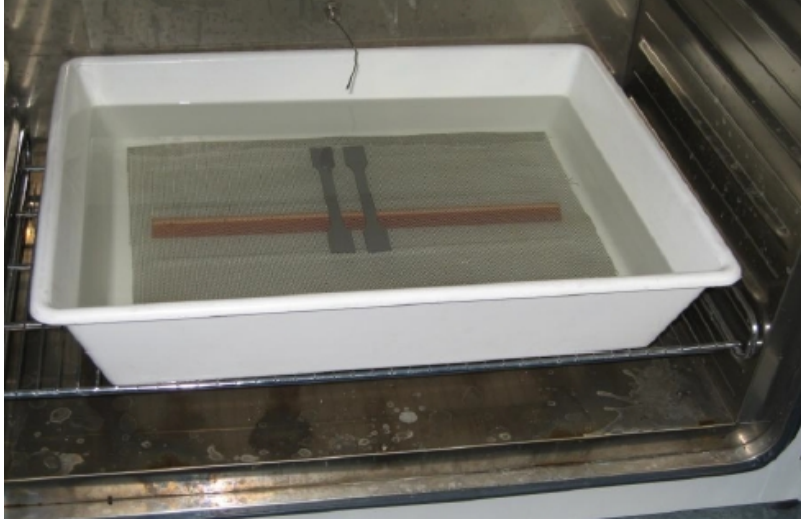
Katalyyttista sideaineen poistoa käytetään, kun on käytössä Catamold-sideainejärjestelmä. Sideaine koostuu kahdesta pääkomponentista: polyasetaalista ja polypropeenista. Sideaineen poisto tapahtuu typpihapossa 100–140 °C:n lämpötilassa. Tässä sideaineen poisto-prosessissa polyasetaaali hajoaa metyylialdehidiksi. Metyylialdehydi on räjähdysherkkää, kun se on tekemisissä hapen kanssa. Tämän takia prosessiin on tehty omat uuninsa, johon syötetään typpihappoa hapen syrjäyttämiseksi. Metyylialdehydi on hyvin myrkyllistä, mutta se voidaan polttaa helposti ja puhtaasti haitattomaksi. Kaikki katalyyttisen sideaineen poistoon tarkoitetut uunit on varusteltu polttimella metyylialdehydinin poistamiseksi. [18, s. 139–140.]

3.5.3 Sideaineen poisto vedessä liuottamalla

Vesiliukoiset sideaineet voidaan poistaa hyvin helposti. Kappaleet upotetaan 40–60 °C lämpöiseen vesihauteeseen ja annetaan olla siellä tarvittava aika, jotta sideainetta on liuennut kappaleesta pois tarpeeksi. Kappaleet kuivataan sideaineen poiston jälkeen. Käytettäessä vesiliukoista materiaalia materiaalitoimittaja antaa ohjeet sideaineen poistoon. Esimerkiksi käytettäessä (liite 3) PolyMIM 316L:ää sideaineen poisto-ohje on seuraavanlainen:

- liuotin: vesi tai tislattu vesi
- lisäaine: Korroosionestoaine Inhibitor 4000, 2 t%
- lämpötila: 40–60 °C
- aika: riippuu kappaleen paksuudesta (esim. 4 mm seinämänpaksuus 10 tuntia 60 °C:ssa)
- kuivaus: 2 tuntia 100 °C:ssa
- painonmuutos: enemmän kuin 3,6 %
- laitteisto: vesihaude tai sideaineenpoistolaitteisto

Vesiliukoisten sideaineiden poisto on menetelmänä hyvin edullinen ja se voidaan toteuttaa hyvin kotikutoisilla laitteilla (kuvio 4).



Kuvio 4. Vesiliukoisen sideaineen poisto. [26].

3.6 Sintraus

Metalliruiskuvalussa sintrauksen perusideana on muodostaa metallipulverimassasta kiinteä ja luja metallikappale menettämättä ruiskuvalettua muotoa. [18, s. 147.]

3.6.1 Sintrauslaitteisto

Sintrausuuneja on kahta eri tyyppiä. On olemassa jatkuvan prosessin uuneja ja panostettavia uuneja. [19] Jatkuvan prosessin uunit toimivat liukuhihnamaisesti. Uuni on jaettu vyöhykkeisiin, jossa sintrausprosessin eri vaiheet tapahtuvat. Uunin vyöhykkeitä ovat esilämmitysalue, sintrausympäristö ja jäähdytysalue. Jatkuvan prosessin uunit voivat tehdä yhtä aikaa sideaineen poistoa ja sintrausta [19]. Yleensä jatkuvan prosessin linjastoon on liitetty aikaisemmat vaiheet eli ruiskuvalu ja sideaineen poisto. Kappaleiden käsittely on myös automatisoitu. Jatkovaa prosessia käytetään vain massatuotannossa, sillä jatkuvan prosessin ylös- ja alasajo on hidasta. Prosessi on käynnissä, vaikkei linjastossa kulje kappaleita [18, s. 174.]

Panostukseen perustuvat uunit toimivat samalla tavalla kuin jatkuvan prosessin uunit. Erona on se, että prosessin eri vaiheet eivät voi tapahtua yhtä aikaa, vaan ne tapahtuvat peräkkäin samassa tilassa. Kappaleet ladotaan uuniin alustoilla. Panostussintrausuunin etuja on sen joustavuus ja sopivuus useimmille materiaaleille. Kun uunissa ei ole kappaleita, niin se ei kuluta sähköä eikä kaasua. [18, s. 174.]

3.6.2 Sintraussykli

Sintrausuunin tyypistä riippumatta sintraussykli on samanlainen. Sintraussyklistä käytetään myös toista nimitystä sintrausprofiili. Perusperiaatteena on lämmittää ruskea kappale hitaasti lämpötilaan, jossa toissijainen sideaine alkaa haihtua. Lämpötilaa pidetään tässä lämpötilassa niin kauan, kunnes kaikki toissijainen sideaine on poistunut. Tämän jälkeen lämpötila nostetaan hitaalla rampilla materiaalista riippuen sintrauslämpötilaan. Sintrauslämpötilassa kappaletta pidetään 1–4 tuntia riippuen siitä, kuinka tiheäksi kappale halutaan saada. [18, s. 176.] Materiaalin toimittajat antavat yleensä sintrausohjeet materiaalien mukaan. Esimerkiksi käytettäessä PolyMIM 316L:ää (liite 3) ohje on seuraavaa:

- Sintrauksen tulisi tapahtua vetyatmosfäärissä.
- Sintrausalustana tulisi käyttää metalliton alusta (esim. alumiinioksidilevy).
- Sintraussykli: Huoneenlämpötilasta nostetaan lämpötilaa 3 °C:ta minuutissa aina 600°C:seen asti, jossa pidetään 2 tuntia. Tämän jälkeen lämpötilaa nostetaan 5°C minuutissa 1360°C:seen, jossa pidetään 2 tuntia. Tämän jälkeen lasketaan lämpötilaa 15°C:ta minuutissa 80°C:seen asti, jonka jälkeen uunista katkaistaan virrat ja annetaan jäähtyä käsittelyä varten.

3.7 Metalliruiskuvalun simulointi

MIM-prosessin simulointi on todella monimutkaista johtuen prosessin monivaiheisuudesta. Simulointi voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen: materiaalin sekoitus, ruiskuvalun simulointi, sideaineenpoiston simulointi ja sintrauksen simulointi.

Tietokonesimuloinnit ovat kehittyneet huomattavasti, mutta todellisuuden kanssa niillä on varsin vähän vielä tekemistä. Materiaalien kirjo, eri prosessit ja prosessien eri variaatiot, muottityökalujen materiaalien vaihtelu ja erilaiset sintrausuunit aiheuttavat sen, että ei ole tarpeeksi kerättyä dataa, jotta voitaisiin yleistää saatuja tuloksia [20]. Simulointia

varten täytyy olla käytettävissä materiaalien ominaisuudet. Näitä ominaisuuksia ovat viskositeetti, tiheys, ominaislämpö ja lämmönjohtavuus. Näistä hankalan tekee se, että tiheys muuttuu lämpötilan ja paineen vaikutuksesta. [21, s. 102.]

Yleisesti ottaen MIM:n simulointi on hyvin epätarkkaa ja kallista puuhaa, joten käytännössä sitä ei tehdä kuin tutkimustasolla. Siitä voi olla jotain hyötyä tuotesuunnittelun alkuvaiheessa, mutta simuloinnista saatuihin tuloksiin on suhtauduttava hyvin varauksella.

Vincent Raymond oli tehnyt vuonna 2012 varsin kattavan kirjallisuus- ja tutkimuskatsauksen metalliriskuvalun simuloinnista ja siihen käytettävistä ohjelmistoista. Tämä seuraava osio on lyhyt tiivistelmä katsauksesta.

MIM:n virtausta on ei-tasalämpöistä kolmiulotteista leikkausohenevaa kaksifaasivirtausta. Numeerista virtausdynamiikkaa eli CFD:tä (Computational Fluid Dynamics) käytetään yleisesti erilaisten fluidivirtausongelmien ratkaisemiseksi. Yleisesti CFD perustuu Navier-Stokesin differentiaaliyhtälöihin. Yhtälöt kuvaavat fluidien liikettä [22]. Yhtälöiden solvelluksia ovat muun muassa FDM (Finite Difference Method), FEM (Finite Element Method) ja FVM (Finite Volume Method).

FDM:

- perustuu Taylorin sarjalla muuttujien arvioimiseen
- vaatii jäsennellyn verkotuksen
- monimutkaisten muotojen verkotus vaikeaa
- sopivalla verkotuksella voi olla hyvinkin tehokas menetelmä

FEM:

- matemaattisesti tarkempi
- osittaisdifferentiaaliyhtälöt kerrotaan testiyhtälöillä ja ne muodostavat määrittelyjoukon, josta saadaan muutos elementissä
- helpompi soveltaa monimutkaisiin muotoihin

FVM:

- perustuu pintojen muutosten tasapainoon ympäröivässä kontrollitilavuudessa
- integroidaan osittaisdifferentiaaliyhtälöitä
- soveltuu myös monimutkaisiin muotoihin
- harvemmin käytetty täyttymisanalyseissa

On olemassa myös muitakin sovelluksia ja niiden yhdistelmiä. Esimerkiksi kaksiulotteista FEM-mallia voidaan yhdistää FDM kanssa simuloitaessa kolmiulotteista virtausta

ohuissa seinämissä. Olemassa olevia ohjelmistoja simulointiin ovat: ANSYS (FVM/FEM), Moldex3D (FVM), MoldFlow (FEM), PIMSolver (FEM/FDM), Plasview3D (FEM), ProCAST(FEM), Sigmasoft (ei tietoa), FEAPIM (FEM). Osa ohjelmistoista on kaupallisia ja osa niin sanottuja talonsisäisiä ohjelmistoja. [21, s. 7– 19.]

4 Testimuotin toimivuus MIM-muottina

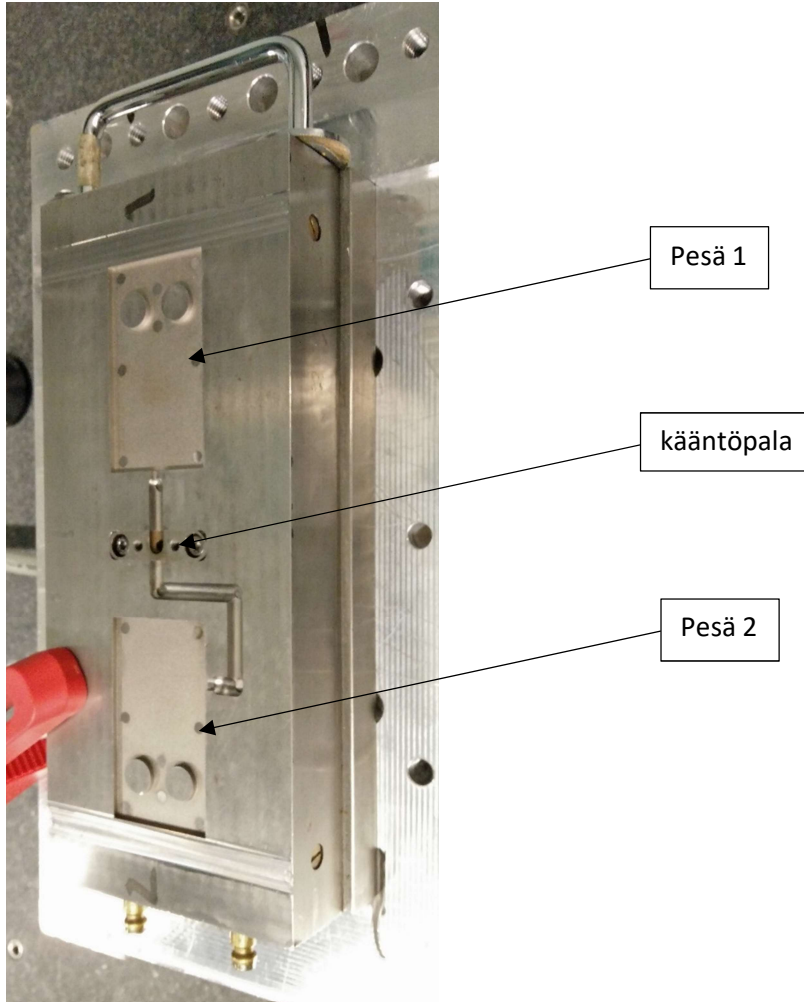
4.1 Testisuunnitelma

Suunnitelma oli, että tehdään ensin testimuotille simuloinnit muovimateriaalia käyttäen Creon Plastic Advisoria, jonka jälkeen ruiskuvaletaan muovimateriaalista tehdyt täyttymissarjat ja valmiit kappaleet. Seuraavaksi oli tarkoitus siirtyä käyttämään MIM-materiaalia, tehdä sillä täyttymissarjat ja ajaa valmiita vihreitä kappaleita. Ensimmäisten MIM-materiaalilla ajettujen täyttymissarjojen tulosten perusteella katsottaisiin, kuinka koellista osiota jatketaan eteenpäin.

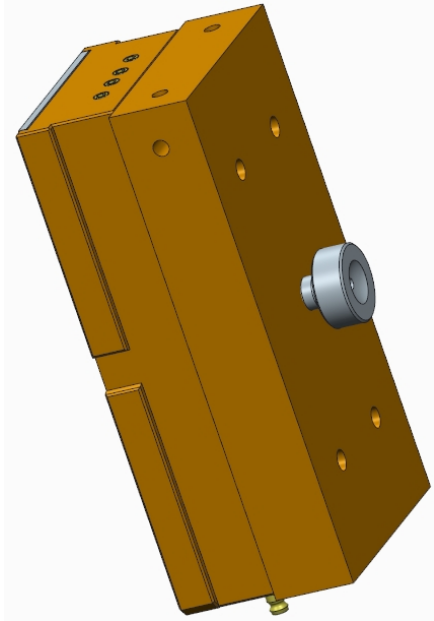
4.2 Testimuotin esittely

Opinnäytetyön testimuottina toimi Karelia-ammattikorkeakoulun kasettimuotti, johon tuotekasettia vaihtamalla saadaan vaihdettua tuotetta. Testimuotissa on yleispätevä ulostyöntöpaketti, joka liikuttaa kasetin omaa tuotekohtaista ulostyöntöä. Opinnäytetyössä käytettävässä kasetissa on kaksi lähes identtistä pesää. Kasetin keskellä on käännettävä irtopala. Irtopalaa kääntämällä valitaan käytettävä pesä. Pesät on mitattu Wenzel-koordinaattimittakoneella. Taulukossa 2 löytyvät muottipesien pesä kohtaisia mittoja ja geometrisyyksiä. Mitattuja asioita olivat: pesän syvyys (p_t), pesän pituus (p_{lx}), pesän leveys (p_{ly}), tuotteen reikäväli pesässä (p_{rv}), reikien halkaisijat pesässä (p_{d1} ja p_{d2}), pesän tasomaisuus (p_{taso}) ja reikien ympyrämäisyys (p_{d1ymp} ja p_{d2ymp}). Liitteessä 5 on mittaraportti, jossa on merkittynä paikat, mistä mittaukset on tehty. Pesissä on päästöt, joiden suuruutta ei tarkasti tiedetä. Kun koordinaattimittakoneen koskettavalla pallomaisella mittakärjellä mitataan päästettyä pystypintaa, se ei kosketa mitattavaa pintaa annetulla syvyydellä, vaan hiukan yli tai ali riippuen päästön suunnasta. Tämä aiheuttaa tuloksiin hiukan mittavirhettä, jonka suuruus on $< 0,02$ mm. Päästön mittaaminen pesistä osoittautui haasteelliseksi, sillä päästöt vaihtelivat pesien seinämissä $0-0,3^\circ$. Pesän mitat mitattiin pesän syvyyden puolivälissä. Kuviossa 5 on tuotekasetin pesien

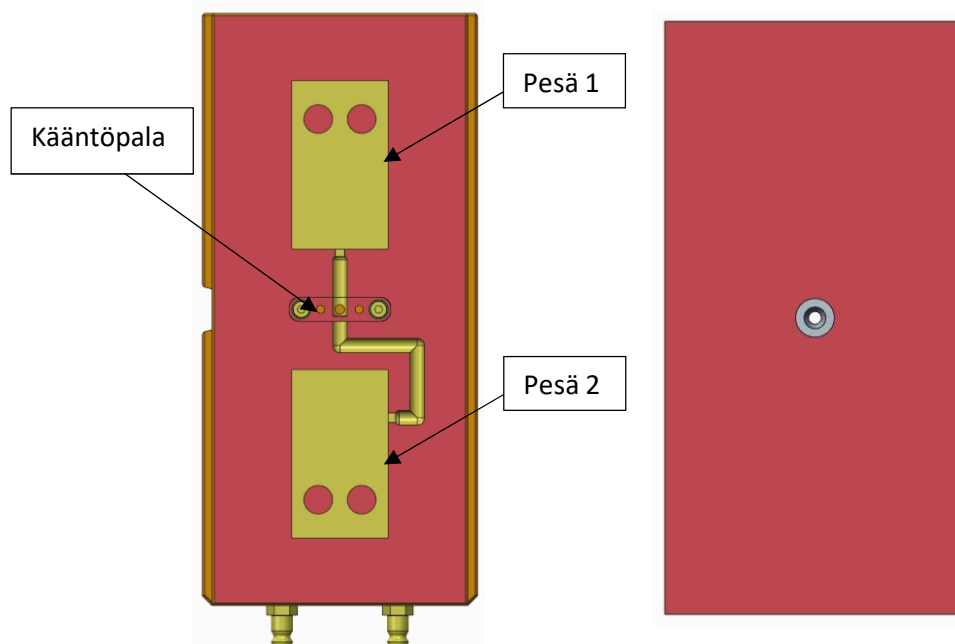
numerointi. Kuvioissa 6–9 on havainnollistettu CAD-mallin avulla tuotekasetti, kanavisto ja tuote.



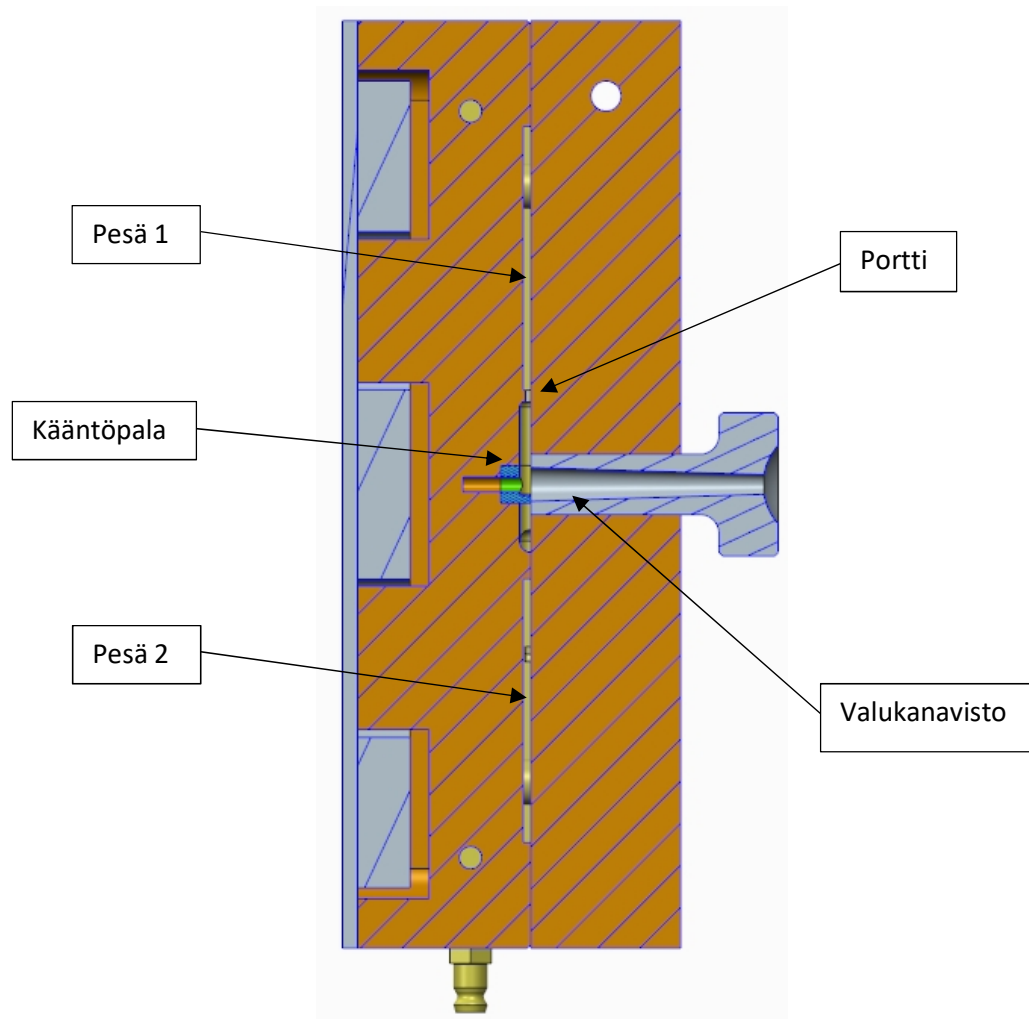
Kuvio 5. Testimuottiin vaihdettava liikkuvan puolen tuotekasetti. Kuvassa ylempi on pesä 1 ja alempi on pesä 2.



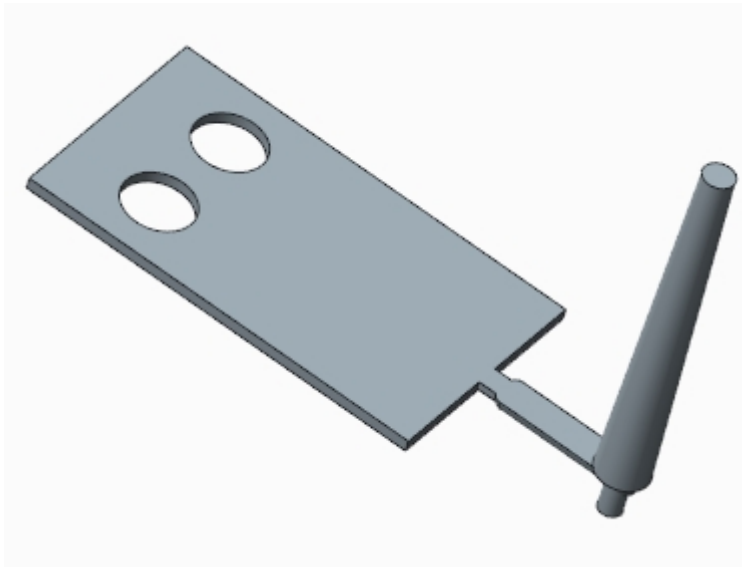
Kuvio 6. CAD-malli testimuotin tuotekaseteista.



Kuvio 7. Testimuotin tuotekasettien jakopinnot. Vasemmalla liikkuvan puolen tuotekasetti ja oikealla kiinteän puolen tuotekasetti. Keskellä liikkuvan puolen tuotekasettia on kääntöpala



Kuvio 8. Testimuotin tuotekaseteista leikkauskuva, jossa näkyy pesän 1 valukanavisto ja portin profiili



Kuvio 9. Testimuotin tuotekasetin pesän 1 CAD-malli tuotteesta ja valukanavistosta

Taulukko 2: Kasetin pesien 1 ja 2 mittoja ja geometrioita. Liitteessä 5 on merkittynä paikat, mistä mittaukset on tehty ja mitä taulukon lyhenteet tarkoittavat.

Muotti pesien mitat (mm), mittaussyvyys 1,01 (mm)									
	p_t	p_lx	p_ly	p_rv	p_d1	p_d2	p_taso	p_d1ymp	p_d2ymp
pesä 1:	2,016	69,975	39,974	17,998	11,903	11,903	0,006	0,006	0,017
pesä 2:	2,015	69,977	39,976	18,000	11,904	11,899	0,007	0,016	0,012

4.3 Täyttymisanalyysi simuloinnilla

Täyttymisanalyysin tekeminen aloitettiin simuloimalla, kuinka muottipesät täyttyvät kahdesta eri ruiskutus pisteistä. Simuloinnin tarkoituksena oli vertailla, kuinka hyvin simuloinnista saatu tulos vastaa todellista tilannetta, kun käytetään muovimateriaalia. Simulointi suoritettiin Creo 2:n Plastic Advisor-lisäosalla. Kappale mallinnettiin ja ruiskutus pisteet merkittiin pisteinä malliin Creo:n CAD-osiossa, josta se siirrettiin Plastic Advisoriin. Kappaleen mitat ovat pesän mittoja, jotka löytyvät liitteestä 5. Simuloinnissa muovimateriaalina käytettiin polystyreeniä. Simuloinnissa käytettiin perusparametreja. Ainut parametri, jota ohjelman asetuksista muutettiin, oli suurin sallittu ruiskutus paine. Sitä nostettiin 500 MPa:lla. Simuloinneissa käytetyt parametrit löytyvät pesälle 1 liitteestä 1 ja pesälle 2 liitteestä 2.

4.4 Täyttymisanalyysin kokeellinen toteutus

Täyttymissarjat ajettiin Karelia-ammattikorkeakoulun Engel-EC100 ruiskuvalukoneella. Ruiskuvalukoneessa sulkuvoimaa on 75 tonnia ja ruuvin halkaisija on 30 mm. Täyttymissarjat ajettiin ilman jälkipainetta ja jäähdytysaika oli 15 sekuntia. Ensiksi haettiin sellainen annoskoko, jolloin kappale tuli lähes täyteen noin 95–99-prosenttisesti. Tämän lähes täyden annoskoon löydyttyä lähdettiin annosta pienentämään 1 mm kerrallaan. Annoskoon vaihdon jälkeen ajettiin aina yksi ylimääräinen kappale, joka poistettiin, jotta annostus tapahtuu koneen ohjauksen annostelemana eikä käsiajolla otetulla annoksella. Kappalet kerättiin talteen dokumentointia varten.

Ensimmäiset täyttymissarjat 1 ja 2 ajettiin molemmilla muottipesillä polystyreenistä. Materiaaliksi valittiin PS Empera 613. Kyseisestä materiaalista ei löytynyt tarkempia materiaalitietoja, joten täyttymissarjat ajettiin yleispätevillä polystyreenille sopivilla arvoilla [23]. Tarkoituksena oli todentaa simuloinnin paikkansapitävyys muovimateriaalilla ja saada vertailukohta MIM-materiaaleille. Täyttymissarjat 3 ja 4 ajettiin kierrätetystä PolyMIM 316L-materiaalista. Täyttymissarjat 5 ja 6 ajettiin neitseellisellä PolyMIM 8620-materiaalilla. Koevalut 7–9 ovat ruiskuvalunopeuden optimointia ja ne ajettiin neitseellisellä PolyMIM 8620-materiaalilla vain testimuotin pesään 1. PolyMIM 316L- ja PolyMIM 8620-materiaalien ruiskuvaluparametrit on otettu materiaalityöntekijän tietolomakkeista (liite 3 ja liite 4).

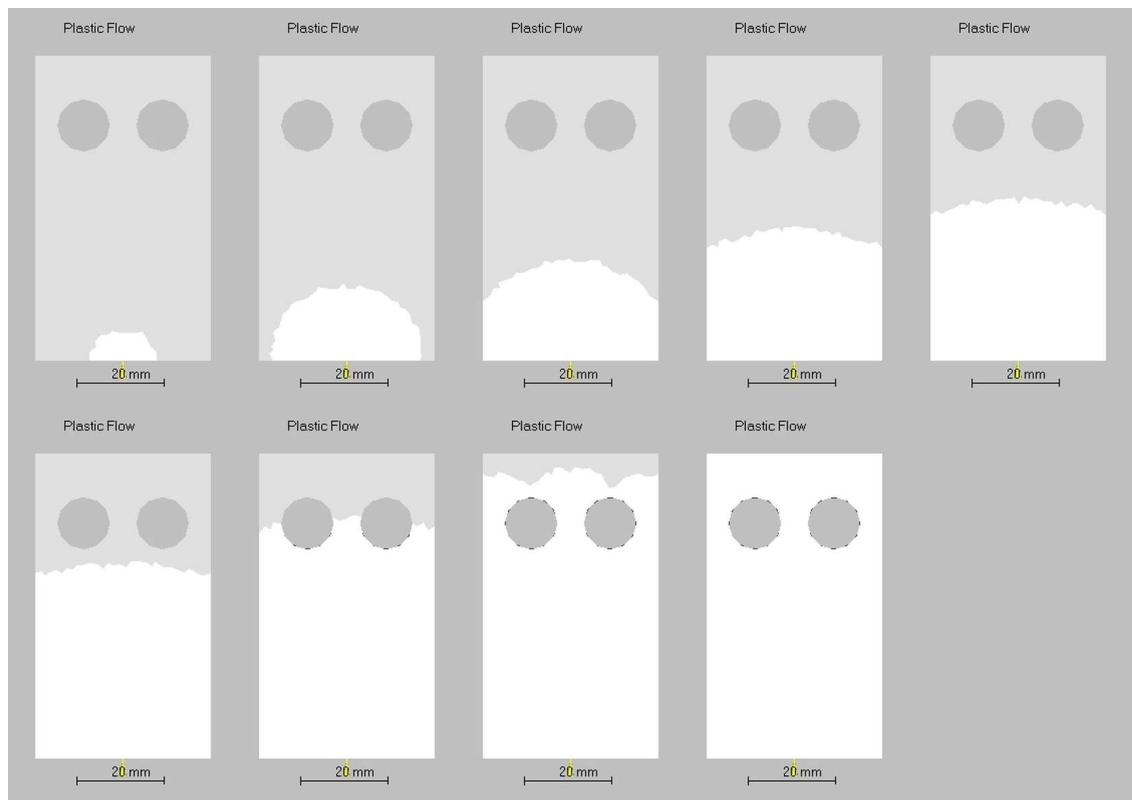
Taulukko 3: Täyttymissarjoissa käytetyt tärkeimmät ruiskuvaluparametrit.

RA = raaka-aine SL = sylinterin lämpötila, v1 = vyöhyke 1, v2 = vyöhyke 2, v3 = vyöhyke 3, s = suutin ML = muotin lämpötila RN = ruiskutusnopeus AN = annostusnopeus VP = vastapaine							
	RA:	Pesä	SL s, v3, v2, v1 (°C):	ML (°C):	RN:	AN (m/min)	VP(bar):
1	Polystyreeni	1	220, 210, 180, 160	50	42 (cm ³ /s) = 60 (mm/s)	15	3
2	Polystyreeni	2	220, 210, 180, 160	50	42 (cm ³ /s) = 60 (mm/s)	15	3
3	PolyMIM 316L	1	185, 183, 180, 175	60	20 (cm ³ /s) = 28 (mm/s)	13,00	30
4	PolyMIM 316L	2	185, 183, 180, 175	60	20 (cm ³ /s) = 28 (mm/s)	13,00	30
5	PolyMIM 8620	1	193, 190, 185, 180	65	20 (cm ³ /s) = 28 (mm/s)	10	20
6	PolyMIM 8620	2	193, 190, 185, 180	65	20 (cm ³ /s) = 28 (mm/s)	10	20
7	PolyMIM 8620	1	193, 190, 185, 180	65	10 (cm ³ /s) = 14 (mm/s)	10	20
8	PolyMIM 8620	1	193, 190, 185, 180	65	6, 6, 2, 2, 2, 2, 2, 2 (mm/s)	10	20
9	PolyMIM 8620	1	193, 190, 185, 180	65	2, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1 (mm/s)	10	20

5 Tulokset

5.1 Simuloinnin tulokset

Kuviossa 10 on Plastic Advisorilla tehty simulointi muottipesän 1 täyttymisestä. Portin paikka on kappaleen alareunassa keskellä. Simuloinnin perusteella pesässä 1 odotuksena oli, että virtaus lähtee etenemään tasaisena virtana portista eteenpäin ja viimeisenä paikkana täyttyy kappaleen yläosa.



Kuvio 10. Plastic Advisorilla tehty simulaatio testimuotin pesän 1 täyttymisestä polystyreenillä.

Kuviossa 11 on Plastic Advisorilla tehty simulointi muottipesän 2 täyttymisestä. Tässä pesässä portin paikka on kappaleen vasemmassa kyljessä. Simuloinnin perusteella pesässä 2 odotuksena oli, että virtaus etenee portista kappaleen oikeaan seinämään tasai-

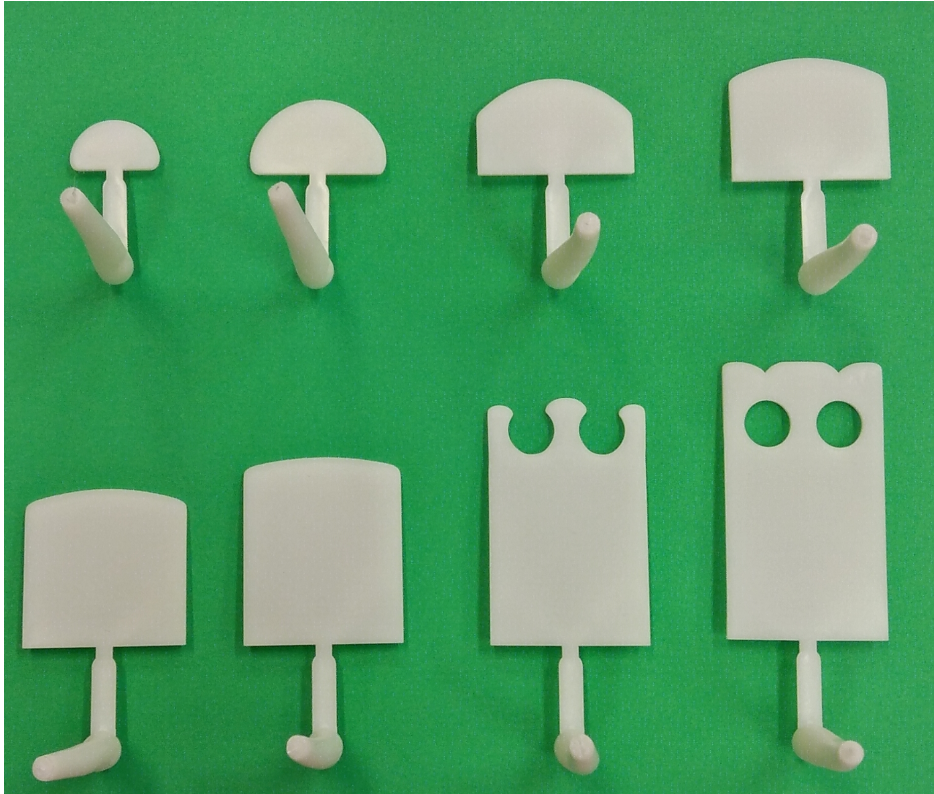
senä virtauksena, jonka jälkeen kappaleen alaosa täyttyy ensimmäisenä. Alaosan täyttyä seuraava täyttyvä paikka on kappaleen vasen ylänurkka ja viimeisenä täyttävänä paikkana on kappaleen oikea ylänurkka.



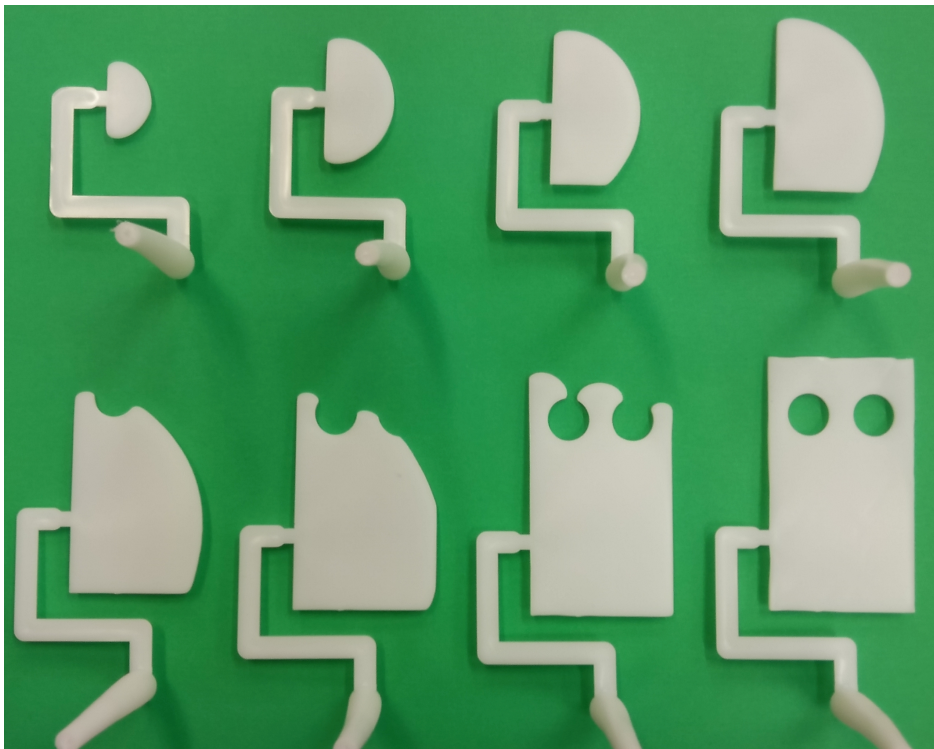
Kuvio 11. Plastic Advisorilla tehty simulaatio testimuotin pesän 2 täyttymisestä polystyreenillä.

5.2 Polystyreenistä ruiskuvaletut täyttymissarjat

Polystyreenistä ruiskuvaletut täyttymissarjat 1 (kuviokuva 12) ja 2 (kuviokuva 13) todentavat simuloinnista saadut tulokset. Pesässä 1 sula muovi virtaa portista tasaisena rintamana lopulta täyttäen kappaleen. Pesässä 2 sula täyttää ensin kappaleen alaosan ja kappaleen oikea ylänurkka täyttyy viimeisenä. Ruiskuvaluparametreja ei tarvinnut säätää ollenkaan. Pesät täyttivät ilman ongelmia taulukon 3 arvoilla.



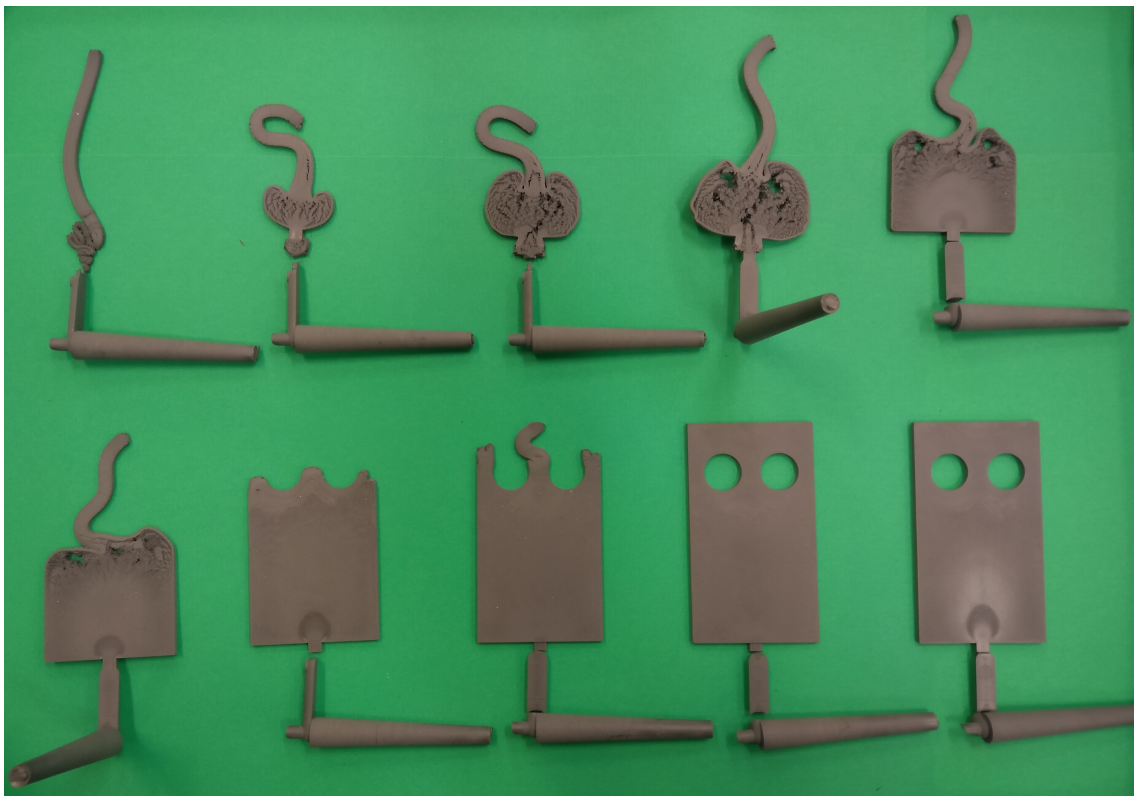
Kuvio 12. Polystyreenistä ruiskuvalettu täyttymissarja 1 (testimuotin pesä 1).



Kuvio 13. Polystyreenistä ruiskuvalettu täyttymissarja 2 (testimuotin pesä 2).

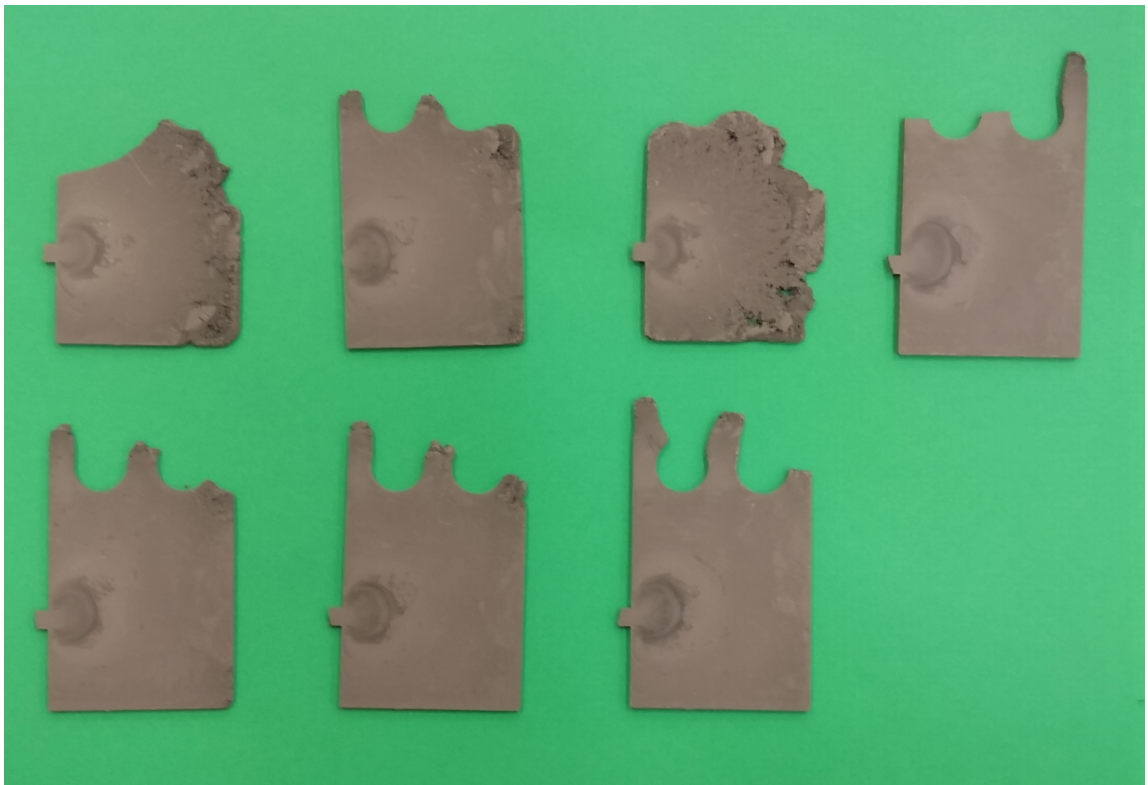
5.3 PolyMIM 316L:stä ruiskuvaletut täyttymissarjat

Täyttymissarja 3 (kuvio 14) ruiskuvalettiin PolyMIM 316L:stä testimuotin pesään 1. Ruiskuvalu aloitettiin materiaalitoimittajan suosittelemilla arvoilla. Ruiskutusnopeutena oli $12 \text{ cm}^3/\text{s}$ ja muottilämpönä 50°C . Pian kuitenkin kävi ilmi, että pesän täytteen saaminen oli hankalaa. Tämän takia päädyttiin nostamaan ruiskutusnopeus $20 \text{ cm}^3/\text{s}$:iin ja muotin lämpötila 60°C :seen. Näillä arvoilla alkoi tulla lähes täysiä kappaleita. Pesän täyttäminen oli todella yllättävää. Pesän täyttäminen alkoi todella pahalla jettingillä. Ensin portista ryntäsi mato kappaleen peräseinään, jonka jälkeen sula muodosti matoa vasten pussin ja vasta pussia vasten alkoi muodostua tasaista sularintamaa. Käytännössä koko keski-osa kappaleesta on yhtymäsaumaa. Huomioitavaa tässä täyttymissarjassa on se, että materiaali oli useamman kerran kierrätettyä.



Kuvio 14. Kierrätetystä PolyMIM 316L-materiaalista ruiskuvalettu täyttymissarja 3 (testimuotin pesä 1).

Täyttymissarja 4 (kuvio 15) yritettiin ruiskuvalaa PolyMIM 316L:stä testimuotin pesään 2. Tämä täyttymissarja epäonnistui aivan totaalisesti. Lähes täyden kappaleen valaminen ei onnistunut alkuunkaan ja eri iskujen välillä oli todella paljon heittoa kappaleen koossa. Esimerkiksi kuviossa 13 on samalla asetuksella ajettuja kappaleita, kaikki keskenään erilaisia. Lisäksi materiaali ei tahtonut pysyä annostuksen jälkeen sylinterissä. Annos purkautui omia aikojaan suutinta vasten (kuvio 16). Samoin kuin edellisessä täyttymissarjassa, tässäkin sarjassa on huomioitavaa, että materiaali oli moneen otteeseen kierrätettyä. Epäilykset alkoivat olla siihen suuntaan, että materiaali oli tullut tiensä päähän tai se oli päässyt kierrätysprosessin aikana kostumaan.



Kuvio 15. Kierrätetystä PolyMIM 316L-materiaalista epäonnistuneesti ruiskuvalettu täyttymissarja 4 (testimuotin pesä 2).



Kuvio 16. Ruiskutusyksikön sylinteristä omia aikojaan karannut PolyMIM 316L-materiaaliannos.

5.4 PolyMIM 8620:stä ruiskuvaletut täyttymissarjat

Edellisen täyttymissarjan epäonnistumisen jälkeen päätettiin ottaa uusi yritys täyttymissarjoista neitseellisellä PolyMIM 8620-materiaalilla. Ruiskuvaluparametreiksi valittiin edellisten sarjojen kokemuksen perusteella suoraan materiaalitoimittajan antamat maksimiarvot. Täyttymissarja 5 (kuvio 17) on valettu pesään 1. Tässäkin on hyvin paha jetting-ongelma. Ensin portista tuli mato, joka ampui suoraan kappaleen takaseinään ja vasta kiemurtelevaa matoa vasten alkoi muodostua pussia, joka muodosti rintaman ja alkoi täyttää kappaletta alhaalta ylöspäin. Käytännössä koko kappale oli yhtä yhtymäsaumaa.



Kuvio 17. Neitseellisestä PolyMIM 8620-materiaalista ruiskuvalettu täyttymissarja 5 testimuotin pesään 1.

Seuraavaksi ruiskuvalettiin täyttymissarja 6 (kuvio 18) pesään 2. Tällä kertaa neitseellinen materiaali toimi tässä pesässä niin, että saatiin ajettua lähes täysiä kappaleita ja iskut olivat toistettavia. Täyttymissarjan tekeminen onnistui. Tässä sarjassa täytyminen alkoi, kuten oli odotettavissa aikaisempien MIM-täyttymissarjojen perusteella. Ensin tuli mato, joka ampui suoraan portista vastapuolella olevaan seinään ja vasta tätä matoa vasten alkoi muodostua rintamaa, joka täytti loppukappaleen. Madon jälkeen täytti kappaleen alaosa ensimmäisenä, jonka jälkeen vasen ylänurkka ja viimeisenä paikkana näytti olevan oikea ylänurkka ja reikien takaosat. Käytännössä tämän kappaleen alaosa oli yhtä yhtymäsaumaa.



Kuvio 18. Neitseellisestä PolyMIM 8620-materiaalista ruiskuvalettu täyttymissarja 6 (testimuotin pesä 2).

5.5 Ruiskutusnopeuden vaikutus muottipesän täyttymiseen

Edellisten sarjojen johtopäätöksenä oli se, että jetting on todellinen ongelma. Koevalussa 7 tarkoituksena oli kokeilla, saadaanko jetting-ongelmaa poistettua tai edes lievennettyä muuttamalla ruiskuvaluparametreja. Koevalu 7 (kuvio 19) ajettiin PolyMIM 8620-materiaalista pesään 1. Ruiskutusnopeutta vähennettiin materiaalitoimittajan suositamaan pienimpään arvoon eli $10 \text{ cm}^3/\text{s}$:iin. Annoskooksi valittiin sellainen koko, että kappale alkoi hieman täyttyä ja katsottiin, esiintyykö jettingiä. Tuloksena oli, että ruiskutusnopeuden vähentäminen ei auttanut.



Kuvio 19. PolyMIM 8620-materiaalista hidastetulla ruiskutusnopeudella ruiskuvalettu koevalu 7 (testimuotin pesä 1).

Koevalu 8 (kuvio 20) ja 9 (kuvio 21) ajettiin myös pesään 1. Koevalussa 8 oli tarkoituksena testata olisiko profiloidusta ruiskutusnopeudesta apua jettingin poistamiseen. Ideana oli ruiskuttaa kanaviston osuus nopeasti ja portin kohdalla tiputtaa ruiskutusnopeutta huomattavasti materiaalitoimittajan antamien arvojen alle. Ruiskutusnopeuden profiili on taulukossa 3. Profiloidusta ruiskutusnopeudesta ei ollut apua.



Kuvio 20. PolyMIM 8620-materiaalista profiloidulla ruiskutusnopeudella ruiskuvalettu koevalu 8 (testimuotin pesä 1).

Koevalussa 9 (kuvio 21) ruiskutusnopeus hidastettiin niin pieneksi kuin oli mahdollista saada. Tuloksena oli jähmettynyt tulppa. Kappaleen kanavisto jähmettyi umpeen jo ennen kuin itse pesä alkoi edes täyttyä.



Kuvio 21. PolyMIM 8620-materiaalista mahdollisimman hitaalla ruiskutusnopeudella ruiskuvalettu koevalu 9 (testimuotin pesä 1).

6 Johtopäätökset

Yhteenvedona edellä läpikäydyistä koevalusarjoista voidaan todeta se, että jos kappaleen ruikutuspiste ja porttigeometria ovat MIM-materiaalille epäsuotuisat, sitä ei voida pelastaa ruiskuvaluparametreilla. Jettingin poistamiseksi ruikutuspisteen tulisi olla suunnattuna seinämään päin ja portin geometrian sellainen, että sulan virtaus ei ainkaan kiihdy portin takia. Kun portin pinta-ala on pienempi kuin sen edellä olevan kanaviston, sulalla ei ole muuta vaihtoehtoa kuin virrata nopeammin eteenpäin. Tämä edesauttaa sulan ryntäämistä.

Vaikka pesä ei täyttynyt oikein, ovat tulokset hyödyllisiä. Saadut tulokset herättävät ajattelemaan, että kun suunnitellaan MIM-tuotetta ja MIM-tuotteelle muottia, on todella tärkeää miettiä mistä kappaletta lähdetään ruiskuttamaan ja mitä vaikutuksia valitulla ruiskutusasteella on tuotteen täyttymiseen ja valmiiseen kappaleeseen. Huonosti valittua

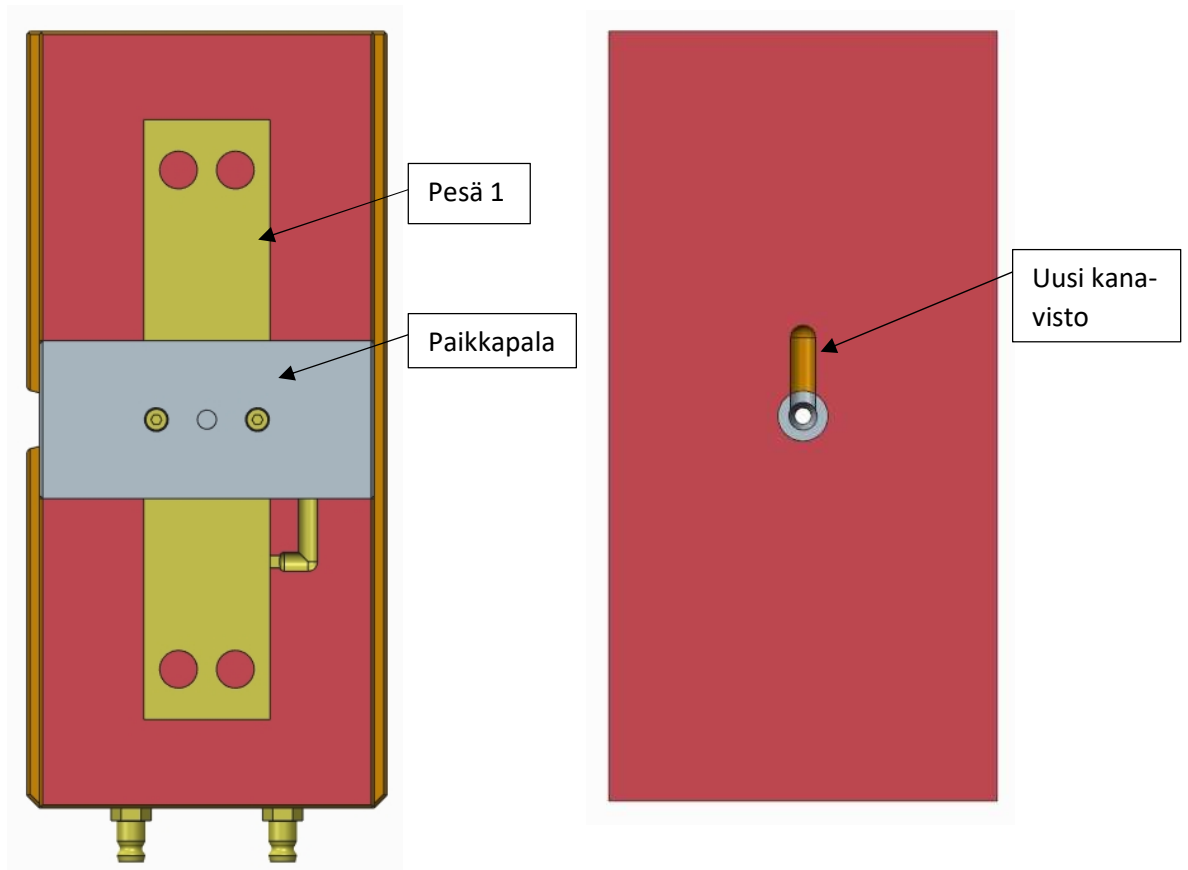
ruiskutus pistettä ja vääränlaista porttia ei voida korjata ruiskuvalun parametreja muuttamalla.

7 Testimuotin modifiointi

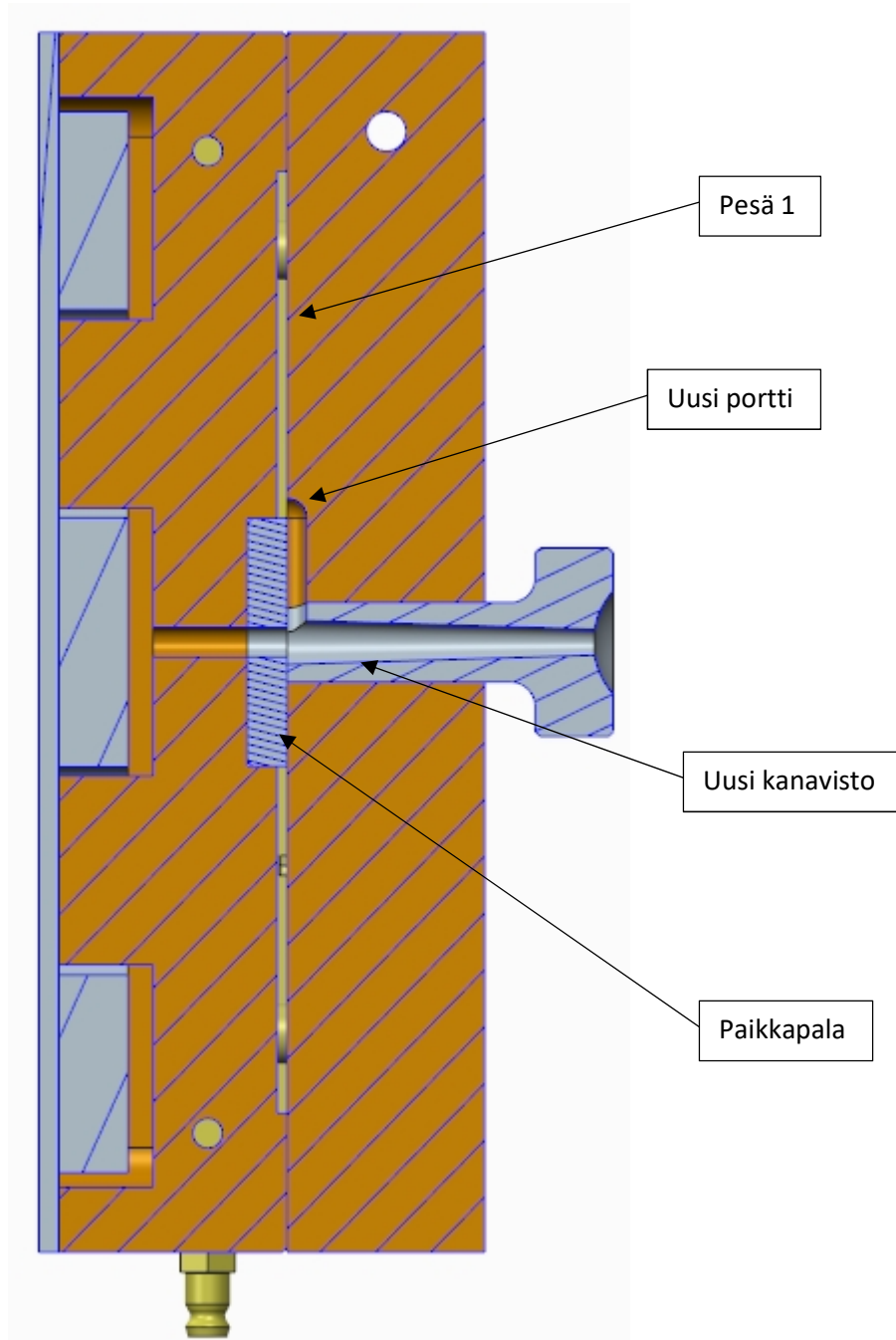
Koevalu tulosten pohjalta testimuotille suunniteltiin modifikaatio, jolla voitaisiin parantaa muottipesän täyttymistä. Tämän opinnäytetyön puitteissa suunnitelmaa ei pystytty toteuttamaan aikataulullisista syistä. Tämä modifikaatio toteutetaan kuitenkin ja siitä raportoidaan toisen opinnäytetyön puitteissa.

Kuviossa 22 vasemmalla on testimuotin liikkuvan puolen kasetti ja oikealla kiinteän puolen kasetti. Suunnitelmana on käyttää hyödyksi vanhaa liikkuvan puolen kasettia, tähän jyrksitään vanhan kanaviston tilalle tasku ja tehdään paikkapala. Kiinnityksessä käytetään hyväksi edellisen kanaviston kääntöpalan kiinnitysreikiä. Kiinteälle puolelle joudutaan tekemään kokonaan uusi kasetti. Vanha kiinteän puolen kasetti on käytössä myös muillakin tuotteilla ja siinä on kiillotuksen jäljiltä oleva pinta, jota ei haluta tuhota. Kiinteälle puolelle on tehtävä myös uusi suutin, johon ajetaan osa uutta kanavistoa. Kuvioissa 23 ja 24 on CAD-mallin kuvankaappauksen avulla esitetty valukanavisto ja tuote.

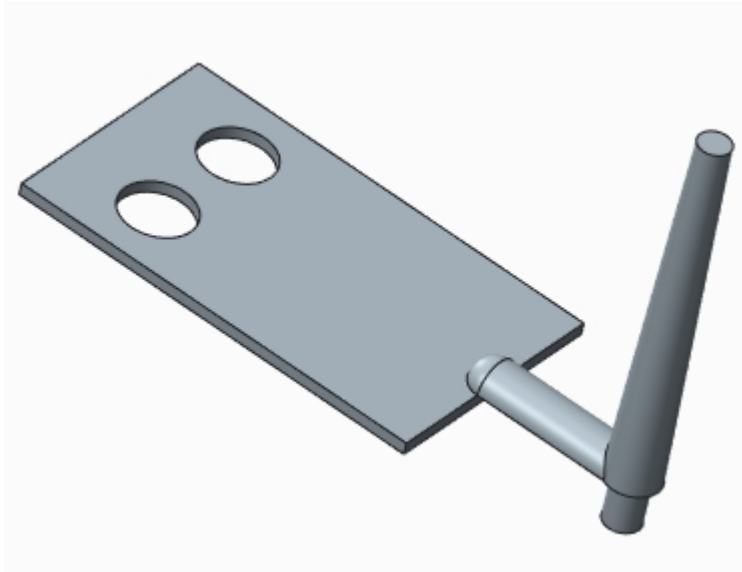
Uuden kanaviston ja portin idea on se, että ruiskutus tapahtuisi seinämää kohden, eikä tyhjää tilaan, kuten vanhassa ratkaisussa. Suunnittelutyön aikaansaannokset on toimitettu 3D CAD-malleina eteenpäin, joiden pohjalta testimuotin modifikaatio voidaan toteuttaa.



Kuvio 22. Testimuotin tuotekasetteihin suunniteltu modifikaatio (pesä 1).



Kuvio 23. Testimuotin tuotekasetteihin suunniteltu syötön muutos (pesä 1).



Kuvio 24. Testimuotin tuotekasetin kappale ja kanavisto muutoksen jälkeen (pesä 1).

8 Pohdinta

8.1 Opinnäytetyönaihe ja opinnäytetyö prosessin kulku

Opinnäytetyön aiheena metalliruiskuvalu oli todella mielenkiintoinen ja erittäin haastava. Suomessa aiheesta ei ole aikaisemmin tehty montaa opinnäytetyötä. Ne mitkä tulivat vastaan, ovat tehty hyvin pintapuoleisesti ja mielestäni sisältävät asiavirheitä. Metalliruiskuvalusta on hyvin vähän suomenkielistä materiaalia ylipäätään. Syy on varmaankin siinä, että koko prosessi on harvinainen Suomessa. Tiedän vain yhden yrityksen nimeltä, joka tekee kaupallista toimintaa metalliruiskuvalu prosessilla. Yritys on Porvoossa sijaitseva Plastoco Oy Ab. Suomessa käytetään jonkin verran MIM-tuotteita, mutta ne ovat lähinnä tuontitavaraa esim. Saksasta ja Kiinasta.

Opinnäytetyön teoriaosion tavoitteena oli etsiä tietoa metalliruiskuvalusta. Tarkastelunäkökulmaksi valittiin, kuinka metalliruiskuvalu eroaa muoviruiskuvalusta ja mitä tulisi ottaa huomioon, kun on tarkoitus valmistaa metallituote MIM-prosessilla. Teoriaosion koostaminen osoittautui todella työlääksi. Aiheesta löytyy tietoa todella paljon kirjoitettuja kirjoja, tutkimuksia ja julkaisuja. Ongelmana tässä oli se, että kaikki hyvä aineisto oli englanniksi ja niissä oli käytetty runsaasti aiheeseen liittyvää erikoissanostoa, jolle oli

todella vaikea löytää hyvää suomenkielistä vastinetta. Tämän takia jo osien tekstien lukeminen ja etenkin tekstin ymmärtäminen tuotti vaikeuksia. Aihepiiri olisi ehkä pitänyt rajata vielä tarkemmin, jotta olisi voinut keskittyä tarkemmin yksityiskohtiin. Mielestäni kuitenkin löysin teoriaosioon paljon hyödyllistä tietoa metalliruiskuvalusta. Tiedosta oli hyötyä kokeellisen osion toteuttamisessa.

Kokeelliselle osiolla toimeksiantona oli, että valitaan jokin olemassa oleva muoville tarkoitettu muotti, valetaan tällä koesarjoja ja katsotaan, mitä saadaan aikaan. Tavoitteena oli selvittää käytännön läheisesti, kuinka metalliruiskuvalu poikkeaa muoviruiskuvalusta.

Ensimmäinen karkea suunnitelma kokeelliselle osiolla oli sellainen, että analysoidaan ensin, miten hyvin opinnäytetyöhön valittu testimuotti toimii metalliruiskuvalussa. Kokeellisen osion ensimmäinen vaiheen oli tarkoitus pitää sisällään seuraavia asioita:

- muotin valinta ja muottipesän mittojen selvittäminen
- täyttymissarjat muovimateriaalilla
- täyttymissarjat MIM-materiaaleilla
- valetaan kappaleita muovimateriaalista
- valetaan kappaleita MIM-materiaaleista
- jatkokäsitellään MIM-kappaleet, otetaan näytteet talteen prosessin eri vaiheissa, mitaillaan muutoksia ja geometrisuuksia kappaleissa prosessin eri vaiheissa
- MIM-kappaleiden täyttymisanalyysi
- MIM-kappaleiden kutistumisanalyysi
- MIM-kappaleiden yhtymäsauma-analyysi

Ensimmäisen osion työvaiheista opittujen tietojen pohjalta oli tarkoitus tehdä valittuun testimuottiin muutuskierros, jolla olisi pyrittäisiin parantamaan tuotteen ruiskuvaltavuutta. Muutostyön jälkeen kokeellisen osion toisessa vaiheessa ajatuksena oli tehdä uudelleen ensimmäisessä osiossa mainitut työvaiheet ja sitten käydä pohtimaan, että onnistuttiinko muutostyössä.

Opinnäytetyön kokeellista osiota jouduttiin muokkaamaan huomattavasti työn edetessä. Hyvin nopeasti MIM-täyttymissarjojen kohdalla havaittiin, että edellä mietitty suunnitelma ei tule toteutumaan. Materiaalia oli käytettävissä aivan liian pieni määrä kyseisen suunnitelmaan. 4 kiloa MIM-materiaalia kuulostaa paperilla aika suurelta määrältä, kun kappaleen paino on joitain kymmeniä grammoja. Pikaisten laskujen mukaan materiaalin olisi tullut riittää noin 60 täyteen kappaleeseen valukanavistoineen ja kierrättämällä valuka-

navistoja olisi saanut noin parikymmentä kappaletta lisää. Käytännössä se ei sitten menytkään niin hyvin kuin paperilla kuviteltiin. Ensinnäkin kun ruiskuvalukone on sekalaisessa käytössä, tarkoittaen sitä, että sillä ajetaan hyvin monen erityyppisiä materiaaleja, niin jo ruiskutusyksikön puhdistamisessa menee todella paljon hukkaan materiaalia koevalun aloitus- ja lopetusvaiheessa. Kierrätystä varten tätä materiaalia, jolla tykkiä huuhdellaan, ei voi kerätä talteen, koska ei ole varmuutta sen sisällöstä. Myös MIM-materiaalin kierrättäminen ilman siihen sopivaa välineistöä koitui hyvin työlääksi ja aikaa vieväksi.

PolyMIM 316L:stä ruiskuvaluttujen täyttymissarjojen jälkeen päätettiin suunnitelmaa supistaa merkittävästi ja keskittyä vain täyttymissarjojen tekemiseen. Vaikka materiaalin määrä olisi jollain ihmeellä ja kierrättämisellä riittänytkin muutamien täysien kappaleiden ajamiseen, olisi se ollut aivan turhaa työtä, koska pesän täyttymisessä ilmeni todella pahaa jetting-ongelmaa. Laadullisesti kappaleista ei voi tulla hyviä, kun pesän täytyminen oli pahasti pielessä. Laadulla tarkoitetaan mekaanisia ominaisuuksia, mittatarkkuutta ja geometrisyyttä. Osansa tähän päätökseen myös vaikutti se, että Karelia-ammattikorkeakoululle luvatusintrausuunin toimitus viivästyi todella paljon. Sintrausuunin käyttöönotto päästiin aloittamaan vasta ihan opinnäytetyön loppumetreillä ja tätä olisi tarvittu myöhempien vaiheiden toteuttamiseen.

8.2 Tulosten hyödynnettävyys

Hankaluuksista huolimatta pidän opinnäytetyötäni hyödyllisenä jatkoa ajatellen. Tämä oli niin sanotusti tienraivaajatyö metalliruiskuvaluun Karelia-ammattikorkeakoulussa. Opinnäytetyöprosessin aikana heräsi paljon enemmän kysymyksiä kuin mitä saatiin vastauksia tai edes kuviteltiin tietävän aiheesta. Jos samaa muottia käytetään jatkossa metalliruiskuvalun opettelussa, esimerkiksi muottipesien mittaraportti on hyödynnettävissä, kun päästään siihen vaiheeseen, että aletaan hienosäätää kappaleen mittoja kohdalleen. Muotin muutostyösuunnitelma on toteutuskelpoinen ja tämä muutostyö on tarkoitus toteuttaa Karelia-ammattikorkeakoululle tehtävässä toisessa opinnäytetyössä. Tästä saatuja tuloksia on sitten tarkoitus hyödyntää uutta MIM-testimuottia suunniteltaessa.

8.3 Käytännön ongelmia ja uudet tutkimuskohteet

Opinnäytetyön kokeellista osiota tehdessä tuli vastaan monia käytännön ongelmia. Moni näistä ongelmista liittyi materiaalin kierrättämiseen ja käsittelyyn. Pieniä protosarjoja valittaessa pienellä materiaali määrällä ongelmaksi muodostuu hyvin helposti materiaalin riittämättömyys. Susikappaleita ja valukanavistoja pitäisi pystyä tarvittaessa kierrättämään nopeasti koevalun aikana, jottei koevalua joudu keskeyttämään materiaalin loppumisen takia.

Materiaalin kierrättämisestä nousee heti esiin toinen ongelma: Kuinka monta kertaa materiaalia voidaan kierrättää vai voidaanko sitä ylipäätään kierrättää? Ei ole tietoa, mikä on materiaalin kierrättämisen vaikutus prosessin muihin vaiheisiin ja lopulliseen tuotteeseen. PolyMIM 316L:stä ajetut täyttymissarjat olivat ainakin näiden ongelmien kanssa painimista ja vahva epäily heräsi, että ainakin toinen sarja meni pilalle materiaalin kosteuden takia. Kierrätetty materiaali pitäisi varmaan kuivata, jos sitä joudutaan varastomaan koevalujen välissä.

Opinnäytetyön ulkopuolella suoritettiin rinnalla myös muita kokeita metalliruiskuvaluun liittyen. Eräs havaittu ongelma käytettäessä PolyMIM 8620-materiaalia oli sideaineen poistoon liittyvät haasteet. Eräs sideainepoistettu protosarja meni pilalle, kun kappaleet olivat ruostuneet. Joitain protokappaleita saatiin sideainepoistettua onnistuneesti, kun käytettiin muovisia liuotusastioita, korroosionestoainetta ja sideaineen poistoaika pidettiin lyhyehkönä. Ruostuneessa protosarjassa sideaineen poistossa käytettiin ruostumaton teräsastiaa, jossa oli myös lämmitysvastukset liuoksen seassa. Oma arvaukseni oli, että saattoi mahdollisesti syntyä sähkökemiallinen pari: ensimmäinen hapettuu ja toinen pelkistyy. Pitäisi ehkä selvittää tarkemmin, mitkä tekijät tosiasiasa ovat ruostumisen takana. Nyt vain koitettiin poistaa kaikki epämääräiset tekijät, mitä tuli tehdessä mieleen.

Kun opinnäytetyössä käytetyn testimuotin syöttö saadaan toimimaan järkevästi ja kappale täyttyy paremmin, voisi paikallaan olla suorittaa niin sanottu gate freeze study. Tällä voitaisiin selvittää kyseiselle kappaleelle optimaalinen jälkipaineaika. Jälkipaineajan löydyttyä voitaisiin ruveta tutkimaan jälkipaineen vaikutusta kappaleen mittoihin ja geometriaan.

Muita tutkittavia aiheita voisi olla yhtymäsaumojen ja sintrauksessa saavutetun tiheyden vaikutus valmiin MIM-kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin. Sideaineen poistossa olisi

mielenkiintoista tutkia käytetyn nesteen lämpötilan vaikutus sintraukseen ja valmiin kappaleen laatuun. Tästä on tehty aikaisemmin opinnäytetyö, mutta siinä on käytetty eri materiaalia [24]. Opinnäytetyössä oli havaittu kappaleissa alentunutta lujuutta, rakoilua ja turpoamista, kun oli käytetty korkeampaa sideaineen poistolämpötilaa.

8.4 Oma oppiminen

Ennen opinnäytetyötä koko metalliruiskuvaluprosessi oli vieras asia itselleni. Muoviruiskuvalusta oli hieman aikaisempaa tietoa, mutta sekin vain pintaraapaisu asiasta, mitä opintojen aikana oli tullut vastaan. Käytännön osaamista ruiskuvalusta ei ollut muuta kuin, että osasin ruiskuvalukoneesta poistaa kappaleen muotin välistä, kuitata hälyn pois ja painaa start-nappia. Osallistuin opinnäytetyön alkupuoliskolla Karelia-ammattikorkeakoulun järjestämään MIM-koulutukseen. Koulutuksen aikana käytiin läpi yleisesti mm. ruiskuvalua, muovimateriaaleja, ruiskuvaluvirheitä, muottitekniikkaa ja hieman metalliruiskuvaluun liittyviä asioita. Tämä koulutus antoi kohtuullisen hyvät eväät lähteä tekemään opinnäytetyötä. Erityisesti on mainittava vielä Karlsruhe Institute of Technologyn vierailevan luennoitsijan Volker Piotterin pitämät MIM-aiheiset luennot, joista sai erittäin hyviä vinkkejä aiheesta ja lähteiden etsimiseen.

Opinnäytetyön kokeellisen osion suurin anti oli itselle ruiskuvalukoneen käytön opettelu, sen asetusten laittaminen ja ymmärrys asetusten vaikutuksesta ruiskuvaluprosessiin sekä lopputuotteeseen. Iso kiitos tästä kuuluu Karelia-ammattikorkeakoulun Jukka Tuloselle, joka kädestä pitäen opetti nämä asiat minulle. Tästä on varmasti hyötyä tulevassa työelämässä. Ruiskuvalu prosessina on monimutkainen. Siitä ei kyllä kaikkea opi hetkessä ja vaatii vuosien kokemusta, jotta voisi sanoa hallitsevansa asian. Mutta sano taanko näin omalta kohdalta, että hyvällä alulla ollaan tämän suhteen.

Lähteet

1. Väyrynen J. MIM-tekniikan demonstraatioympäristön vaatimat investoinnit. Karelia-ammattikorkeakoulu. Tiivistelmä. 2015. <http://lomakkeet.pkamk.fi/webproha/projekti.aspx?pid=344&lan=fi> 12.2.2017.
2. Väyrynen J. Demonstraatioympäristö MIM-tekniikan uusiin ja haasteellisiin kokeiluihin. Karelia-ammattikorkeakoulu. Tiivistelmä. 2015. <http://lomakkeet.pkamk.fi/webproha/projekti.aspx?pid=343&lan=fi> 12.2.2017.
3. German R. M. Metal Injection Molding A Comprehensive MIM Design Guide. Princeton: Metal Powder Industries Federation. 2011.
4. European powder metallurgy association. Metal Injection Moulding (MIM). Esite. 2017. <http://www.epma.com/metal-injection-moulding> 12.2.2017.
5. Heaney D.F. Designing for metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney D (toim.). Handbook of metal injection molding. UK: Woodhead Publishing Limited. 2012.
6. Powder Injection Moulding International. Binders and binder removal techniques in Metal Injection Moulding. Artikkel. 2017. <http://www.pim-international.com/metal-injection-molding/binders-and-binder-removal-techniques/> 12.2.2017.
7. Gonzalez-Gutierrez, J., Stringari G. B. & Emri I. Powder Injection Molding of Metal and Ceramic Parts. Teoksessa Wang J. (toim.) Some Critical Issues for Injection Molding. 2012. PDF julkaisu www.intechopen.com
8. Ahn S., Park J. P., Lee S., Atre S. & German R. M. Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder... 2009. PDF julkaisu www.researchgate.net
9. Enneti R. K., Onbattuvelli V.P. & Atre S.V. Powder binder formulation and compound manufacture in metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney D (toim.) Handbook of metal injection molding. UK: Woodhead Publishing Limited. 2012.
10. Piotter V. Tutorial Powder Injection Molding (PIM). Luentomateriaali. 2016.
11. Nuutamo V. Ruiskuvalun perusteet. Luentomateriaali. 2015.
12. Heaney D.F. & Greene C.D. Molding of components in metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney D (toim.). Handbook of metal injection molding. UK: Woodhead Publishing Limited. 2012. S.112–113, 118–122.
13. Smith T. Injection Moulding: Gate Freeze Study: Danger in a Name? Plastics Technology. Artikkel. 2016. <http://www.ptonline.com/columns/gate-freeze-study-danger-in-a-name> 12.2.2017.
14. Hwang K. S. Common defects in metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney D (toim.). Handbook of metal injection molding. UK: Woodhead Publishing Limited. 2012.
15. Schlipper G. Tooling for metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney D (toim.). Handbook of metal injection molding. UK: Woodhead Publishing Limited. 2012.
16. Walcher H., Knöpfle C. & Maetzig M. Influence of Process Parameters of the Quality of MIM Parts. Piotter V.:n julkaisema käsikirjoitus World PM2016 seminaarista. 2016.
17. German R. M. Metal powder injection molding (MIM): key trends and markets. Teoksessa Heaney D (toim.). Handbook of metal injection molding. UK: Woodhead Publishing Limited. 2012.
18. Banerjee S. & Joens C. J. Debinding and sintering of metal injection molding (MIM) components. Teoksessa Heaney D (toim.). Handbook of metal injection molding. UK: Woodhead Publishing Limited. 2012.
19. Sparkman T. MIM process series part 6 – sintering. Blogi. 2015. <https://www.dynacast.com/blog-mim-process-series-part-6-sintering> 2017.

20. Kang T.G., Ahn S., Chung S.H., Chung S.T., Kwon Y. S. Park S. J. & German R. M. Modeling and simulation of metal injection molding. Teoksessa Heaney D (toim.). Handbook of metal injection molding. UK: Woodhead Publishing Limited. 2012.
21. Vincent R. Metal injection molding development: modeling and numerical simulation of injection with experimental validation. Montréal: Département de génie mécanique école polytechnique de montréal. Lopputyö. 2012.
22. Kuzmin D. Introduction to Computational Fluid Dynamics. Institute of Applied Mathematics University of Dortmund. Luentomateriaali. 2017. <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf> 12.3.2017
23. Whelan T. & Goff J. Injection Moulding of Thermoplastics Materials – 1. Great Britain: Woolnough Bookbinding. 1988.
24. Hales A. Metal Injection Moulding of Inconel 718 using a Water Soluable Binder System. The University of Sheffield. Opinnäytetyö. 2015.
25. Plastoco Oy Ab. MIM-prosessi kaavio. Kuvio. 2016. www.plastoco.fi 20.7.2016
26. Soberheim B. polyMIM Debinding in Detail. PolyMIM GmbH. Materiaalitoimittajan pdf-ohje. 2012.

Liitteet


1. Polystyreeni simuloinnin parametrit (pesä 1)
2. Polystyreeni simuloinnin parametrit (pesä 2)
3. PolyMIM 316L-tietolomake
4. PolyMIM 8620-tietolomake
5. Testimuotin tuotekasetin muottipesien 1 ja 2 mittaraportti.

Polystyreeni simuloinnin parametrit (pesä 1)


Results Summary

General	
Model Suitability :	Part model was highly suitable for analysis.
Part Name :	testikappale_1
Material	
Material Supplier :	Generic Shrinkage Characterised Material
Material Trade Name :	Generic PS (Sumibright)
Processing Conditions	
Mold Temperature :	45.00 deg.C
Melt Temperature :	220.00 deg.C
Max Injection Pressure Limit :	500.00 MPa

Filling Analysis	
Actual Injection Time :	0.70 sec
Actual Injection Pressure :	12.36 MPa
Weld lines :	Yes
Air Traps :	Yes
Shot Volume :	5.17 cu.cm
Filling Clamp Force :	1.65 tonne
Estimated Cycle Time :	13.44 sec
Warnings	
No problems were detected	

 Your part can be easily filled with acceptable quality using the current injection locations.

Polystyreeni simuloinnin parametrit (pesä 2)

Results Summary	
General	
Model Suitability :	Part model was highly suitable for analysis.
Part Name :	testikappale_1
Material	
Material Supplier :	Generic Shrinkage Characterised Material
Material Trade Name :	Generic PS (Sumibright)
Processing Conditions	
Mold Temperature :	45.00 deg.C
Melt Temperature :	220.00 deg.C
Max Injection Pressure Limit :	500.00 MPa
Filling Analysis	
Actual Injection Time :	0.67 sec
Actual Injection Pressure :	11.01 MPa
Weld lines :	Yes
Air Traps :	Yes
Shot Volume :	5.17 cu.cm
Filling Clamp Force :	1.66 tonne
Estimated Cycle Time :	13.41 sec
Warnings	
No problems were detected	
 Your part can be easily filled with acceptable quality using the current injection locations.	

PolyMIM 316L-tietolomake

**Data Sheet - polyMIM® 316L**

Version 05 / 07.2011

Am Gefach
55566 Bad Sobernheim
Telefon: +49 6751 85769-0
Telefax: +49 6751 85769-5300
info@polymim.com
www.polymim.com

Product <i>Produkt</i>	polyMIM® 316L D 120E									
Product description <i>Produktbeschreibung</i>	Feedstock for metal injection moulding.									
Oversize factor* <i>Aufmaßfaktor</i>	Min. 1,1627	Average 1,1669	Max. 1,1711							
All specified dimensions must be multiplied by this rate.										
MVR [cm³/10min] <i>Schmelzvolumenrate</i>	Min. 15,0	Average 40,0	Max. 65,0	DIN EN ISO 1133 (190°C/10kg)						
Typical Composition <i>(as sintered in % by weight)</i> <i>Typische Zusammensetzung</i>		Fe	C	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	S	P
	>	-	-	10,0	16,0	2,0	-	-	-	-
	<	Bal.	0,03	14,0	18,5	3,0	2,0	1,0	0,03	0,045
Typical properties <i>Typische Eigenschaften</i>				as sintered	heat treated					
	Density <i>Dichte</i>	≥	7,90 g/cm ³							
	Yield strength Rp02 <i>Streckgrenze</i>	≥	140 MPa							
	Tensile strength Rm <i>Zugfestigkeit</i>	≥	450 MPa							
	Elongation A10 <i>Bruchdehnung</i>	≥	40 %							
	Hardness <i>Härte</i>	≥	120 HV1							
Injection process <i>Spritzgußprozess</i>	Cylinder temperature <i>Zylindertemperatur</i>	Zone 1 170°C	Zone 2 175°C	Zone 3 180°C	Zone 4 183°C	Zone 5 185°C				
	Tool temperature <i>Werkzeugtemperatur</i>	40-80°C								
	Injection speed <i>Einspritzgeschwindigkeit</i>	3-20 cm ³ /s								
	Screw circumferential speed <i>Schneckenumfangsgeschwindigkeit</i>	5-20 m/min								
	Injection speed <i>Einspritzdruck</i>	550-700 bar								
	Hold pressure <i>Nachdruck</i>	400-650 bar								
	Back pressure <i>Staudruck</i>	20-30 bar								
Debinding process <i>Entbinderungsprozess</i>	Solvent <i>Flüssigkeit</i>	Water or distilled water								
	Additive <i>Badzusatz</i>	Corrosion inhibitor: Inhibitor 4000 (Zschimmer & Schwarz, Quantity added : 2Vol%)								
	Debinding temperature <i>Entbinderungstemperatur</i>	40- 60°C								
	Debinding time <i>Entbinderungszeit</i>	depending on part thickness (e.g. 4mm part approx. 10 h at 60°C)								
	Drying <i>Trocknung</i>	to constant weight, approx. 2 h at 100°C (drying under vacuum preferable)								
	Weight loss <i>Gewichtsverlust</i>	> 3,8 weight%								
	Equipment <i>Anlagentechnik</i>	Water bath or debinding equipment								
Sintering process <i>Sinterprozess</i>	Sintering atmosphere <i>Sinteratmosphäre</i>	100% dry hydrogen								
	Sintering substrata <i>Sinterunterlage</i>	Non-metallic base (e.g. Al ₂ O ₃)								
	Sinterzyklus <i>Sintering cycle</i>	RT – 3K/min – 600°C, 2h hold 600°C – 5K/min – 1360°C, 2.0h hold 1360°C – 15K/min – 80°C, cooling								



1 / 3



PolyMIM 8620-tietolomake

**Data sheet - polyMIM® 8620 (80031)**

Version 04 / 03.2014

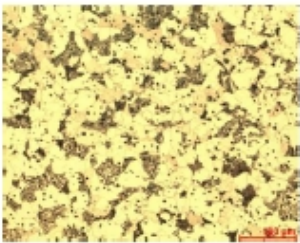
Am Gefach

55566 Bad Sobernheim

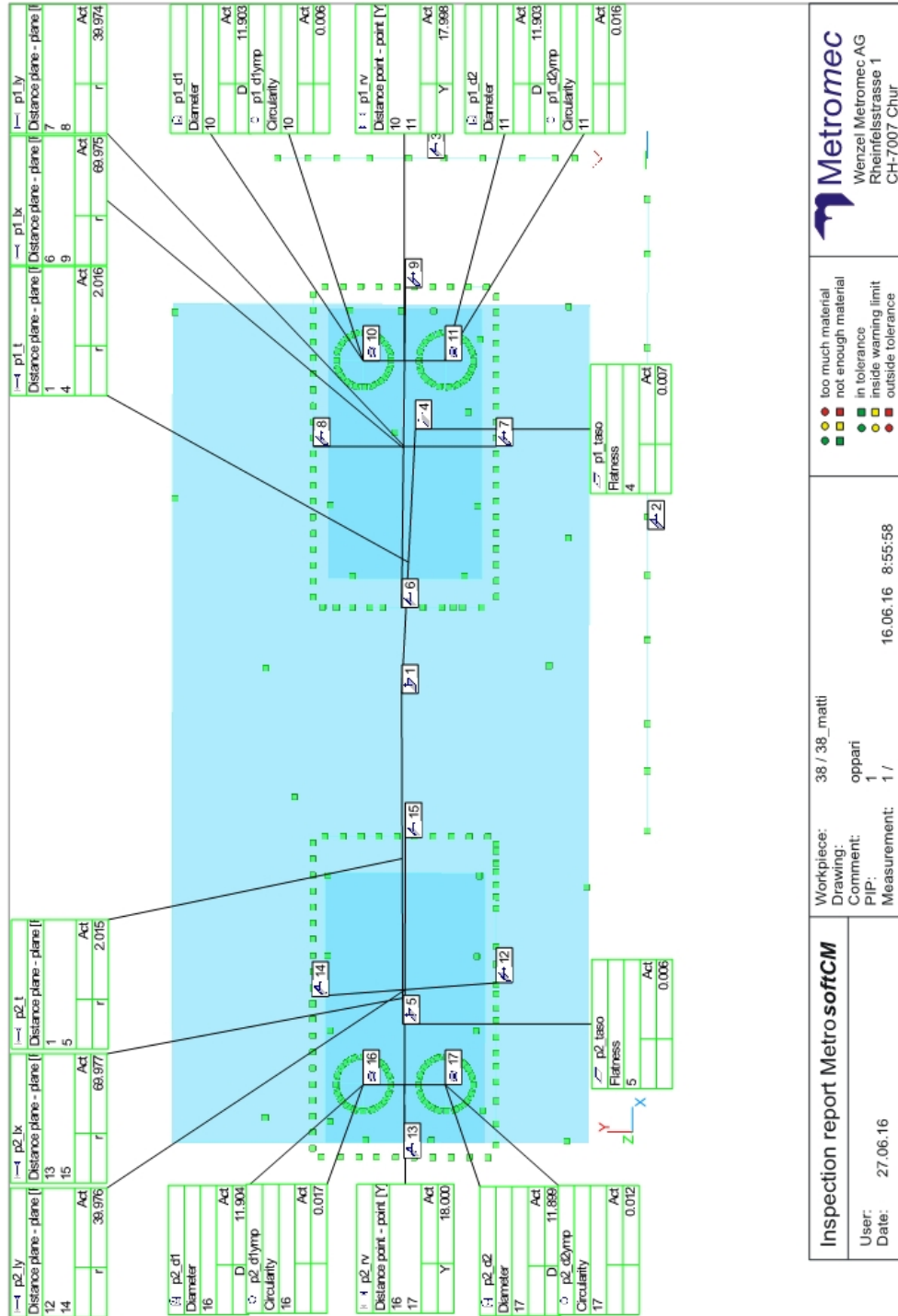
Telefon: +49 6751 85769-0

Telefax: +49 6751 85769-5300

info@polymim.comwww.polymim.com

Product <i>Produkt</i>	polyMIM® 8620 C 322E								
Product description <i>Produktbeschreibung</i>	Feedstock for metal injection moulding.								
Oversize factor* <i>Aufmaßfaktor</i>	Min. 1,1820	Average 1,1863	Max. 1,1906	All specified dimensions must be multiplied by this rate.					
MVR [cm³/10min] <i>Schmelzvolumenrate</i>	Min. 5,5	Average 20,5	Max. 30,5	DIN EN ISO 1133 (190°C/10kg)					
Typical Composition <i>(as sintered in % by weight)</i> <i>Typische Zusammensetzung</i>		Fe	C	Ni	Cr	Mo	Mn	S	P
	>	-	0,12	0,4	0,4	0,15	0,7	-	-
	<	Balance	0,23	0,7	0,6	0,25	0,9	0,03	0,03
Typical properties <i>Typische Eigenschaften</i>			as sintered	heat treated					
	Density <i>Dichte</i>	≥	7,40 g/cm³						
	Yield strength Rp02 <i>Streckgrenze</i>	≥	400 MPa						
	Tensile strength Rm <i>Zugfestigkeit</i>	≥	650 MPa						
	Elongation A10 <i>Bruchdehnung</i>	≥	3 %						
	Hardness <i>Härte</i>	≥	190 HV1	650-800HV					
Injection process <i>Spritzflußprozess</i>	Cylinder temperature <i>Zylindertemperatur</i>	Zone 1 175°C	Zone 2 185°C	Zone 3 187°C	Zone 4 190°C	Nozzle 193°C			
	Tool temperature <i>Werkzeugtemperatur</i>	50-65°C							
	Injection speed <i>Einspritzgeschwindigkeit</i>	10-30 cm³/s							
	Screw circumferential speed <i>Schneckenumfangsgeschwindigkeit</i>	6-10 m/min							
	Injection speed <i>Einspritzdruck</i>	850/1150 bar							
	Hold pressure <i>Nachdruck</i>	550-750 bar							
	Back pressure <i>Staudruck</i>	20-30 bar							
Debinding process <i>Entbinderungsprozess</i>	Solvent <i>Flüssigkeit</i>	Water or distilled water							
	Additive <i>Badzusatz</i>	Corrosion inhibitor: Inhibitor 4000 (Zschimmer & Schwarz, Quantity added : 2Vol%)							
	Debinding temperature <i>Entbinderungstemperatur</i>	40- 60°C							
	Debinding time <i>Entbinderungszeit</i>	depending on part thickness (eg 4mm part approx. 10 h at 60°C)							
	Drying <i>Trocknung</i>	to constant weight, approx. 2 h at 100°C (drying under vacuum preferable)							
	Weight loss <i>Gewichtsverlust</i>	> 3,8 weight%							
	Equipment <i>Anlagentechnik</i>	Water bath or debinding equipment							
Sintering process <i>Sinterprozess</i>	Sintering atmosphere <i>Sinteratmosphäre</i>	100% dry nitrogen							
	Sintering substrata <i>Sinterunterlage</i>	Non-metallic base (e.g. Al ₂ O ₃)							
	Sintering cycle <i>Sinterzyklus</i>	RT – 5K/min – 600°C, 1,0h hold 600°C – 5K/min – 1290°C, 2,0h hold 1290°C – 15K/min – 80°C, cooling							

Testimuotin tuotekasetin muottipiesien 1 ja 2 mittaraportti



Metromec Wenzel Metromec AG Rheinfelsstrasse 1 CH-7007 Chur	Workpiece: 38 / 38_matti Drawing: oppari Comment: 1 / PIP: 1 / Measurement: 1 /	16.06.16 8:55:58