



STUDI AWAL PEMBUATAN *FEEDSTOCK METAL INJECTION MOULDING* MENGUNAKAN *TORQUE RHEOMETER*

PRELIMINARY RESEARCH OF FEEDSTOCK PREPARATION FOR METAL INJECTION MOLDING USING TORQUE RHEOMETER

Eva Afrilinda, Shinta Virdhian dan Martin Doloksaribu

Balai Besar Logam dan Mesin, Kementerian Perindustrian

Jalan Sangkuriang No 12 Bandung, Jawa Barat 40135

email : eva.afrilinda@kemenperin.go.id, shinta_va@gmail.com, martin-d@kemenperin.go.id

Abstrak

Meningkatnya kebutuhan masyarakat akan alat transportasi, telekomunikasi dan peralatan kesehatan akan berdampak pada kemampuan industri dalam melakukan produksi secara efektif dan efisien. *Metal Injection Moulding (MIM)* merupakan solusi teknologi lanjut yang dapat digunakan untuk menghasilkan produk/komponen berukuran kecil dan presisi dengan bentuk yang kompleks. Persiapan *feedstock* (bahan baku) berperan sangat penting dalam proses *MIM* karena kualitas *feedstock* akan mempengaruhi kualitas produk akhir. *Feedstock* adalah campuran (*mixed*) antara serbuk (*powder*) dan pengikat (*binder*) yang homogen dengan rasio perbandingan tertentu dan memiliki perilaku pseudo-plastik. Pada proses *MIM* laju geser yang digunakan selama proses injeksi berkisar antara $100-10000\text{ s}^{-1}$ dengan viskositas maksimum sebesar 1000 Pa.s . Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik rheologi *feedstock* melalui nilai laju geser dan viskositasnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *feedstock* Fe-2%Ni dengan *binder* 79%(PW) + 20%(HDPE) + 1%(SA) dan *feedstock* Fe-2%Ni dengan *binder* 79%(PW) + 20%(EVA) + 1%(SA) memenuhi syarat rheologi sebagai *feedstock Metal Injection Molding*.

Kata Kunci : *feedstock, binder, mixing*

Abstract

The increasing of public demand in transportation, telecommunications and medical equipment will make an impact on the industry's production ability to be more effective and efficient. *Metal Injection Molding (MIM)* is one of advanced technologies solution which it allows the mass production of small and precision products with a very complex shape. *Feedstock* (raw materials) preparation plays a very important role in the *MIM* process because the quality of the *feedstock* will affect the quality of the final product. *Feedstock* is a homogeneous mixture of powder and binder with a certain amount ratio and has a pseudo-plastic behavior. In *MIM* process, the shear rate used during the injection process around $100-10000\text{ s}^{-1}$ with a maximum viscosity of 1000 Pa.s . This research is conducted to determine the rheological characteristics of *feedstock* by the value of shear rate and viscosity. The result shows that Fe-2%Ni *feedstock* with 79% binder (PW)+20% (HDPE)+1% (SA) and Fe-2%Ni *feedstock* with 79% binder (PW) + 20% (EVA) + 1% (SA) have qualified the rheology requirement as a *Metal Injection Molding feedstock*.

Keyword : *feedstock, binder, mixing*

PENDAHULUAN

Pertumbuhan industri yang sangat pesat merupakan dampak dari meningkatnya kebutuhan masyarakat akan produk yang berkualitas sehingga dibutuhkan suatu proses yang efektif dan efisien. *Metal injection*

molding (MIM) merupakan gabungan dari proses *powder metallurgy* dan *plastic injection molding* yang diaplikasikan pada pembuatan produk/komponen yang memerlukan sifat mekanis yang tinggi (*high performance*), fleksibilitas desain dan

material, permukaan akhir yang baik, jumlah produksi yang tinggi sehingga dapat mengurangi secara signifikan biaya manufaktur. Pembuatan komponen menggunakan proses *MIM* dapat menghasilkan produk/komponen berukuran kecil, presisi dan memiliki karakteristik *near net shape* dengan bentuk kompleks sehingga terkadang tidak memerlukan proses lanjutan (German 2011).

MIM sebagai salah satu *advanced technology* untuk membuat produk/komponen yang diaplikasikan pada beberapa material maju yang sulit diproses dengan teknologi yang lain seperti pengecoran dan pemesinan. Produk *MIM* banyak diaplikasikan untuk peralatan kesehatan, elektronik, kedirgantaraan, otomotif, kebutuhan militer, dll. Proses *MIM* menggunakan bahan baku yaitu serbuk logam yang memiliki ukuran antara 5-100 μm dicampur (*mixing*) dengan pengikat (*binder*) polimer menghasilkan produk yang dinamakan pelet (*feedstock*). Umumnya *feedstock* komersial memiliki rasio perbandingan komposisi 60% serbuk logam dan 40% *binder* (Hossain, dkk 2015). Bahan baku tersebut yang kemudian akan diproses untuk menghasilkan suatu produk/komponen. Akan tetapi penggunaan teknologi *MIM* mengalami kendala dalam pengadaan *feedstock*/bahan baku yang belum bisa diproduksi dalam negeri sehingga harus impor dari luar negeri.

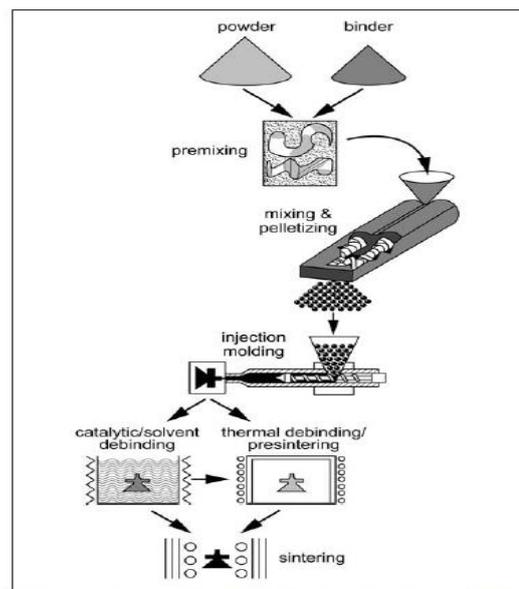
Dari penelitian ini diharapkan Indonesia mampu memproduksi *feedstock* di dalam negeri sehingga dapat mengurangi ketergantungan kita terhadap bahan baku impor. Selain itu, pembuatan *feedstock* dalam negeri juga mampu menghemat biaya pembelian bahan baku (*feedstock*) sekitar 10-30% dari biaya produksi produk *MIM*.

Berikut beberapa perbandingan harga bahan baku serbuk logam Fe-2%Ni serbuk yang dibuat dengan proses *gas atomized* berkisar 21 \$/kg sedangkan dalam bentuk *feedstock* berkisar 31 \$/kg. Harga serbuk Nikel yang dibuat dengan proses *carbonyl* berkisar 94 \$/kg sedangkan dalam bentuk *feedstock* berkisar 112 \$/kg. Untuk serbuk Titania yang di buat dengan proses *gas atomized* berkisar 125 \$/kg sedangkandalam bentuk *feedstock* berkisar 180 \$/kg. Untuk harga dari sistem *binder* yang banyak digunakan seperti PP, PE dan EVA

berkisar antara 2 \$/kg dan *wax* 2,4 \$/kg (German 2011).

Proses Metal Injection Moulding (MIM)

Secara garis besar proses produksi komponen dengan proses *MIM* terdiri atas empat tahapan yang secara lebih jelas dapat dilihat gambar skema seperti pada pada Gambar 1. Proses ini terdiri dari proses pencampuran (*mixing*), pencetakan (*Injection Moulding*), *debinding*, dan sintering. Serbuk logam dan *binder* dicampur dalam sebuah *mixer* dan kemudian dibuat pelet untuk mempermudah proses injeksi. Kemudian pelet dimasukkan ke dalam *hopper* mesin *injection molding*. Setelah itu campuran tersebut dilelehkan dan diinjeksi pada tekanan tertentu sehingga dapat mengisi rongga cetakan (proses *injection molding*). Hasil *injection molding* (*green part*) dihilangkan pengikatnya secara kimiawi dan *heat treatment*. Hasil benda setelah di *debinding* dinamakan *brown part*.



Gambar 1. Skema *MIM* (German 2011)

Kemudian dilakukan proses *sintering* untuk memadatkan dan meningkatkan kekuatan dari serbuk logam. *Sintering* dilakukan pada temperatur di bawah temperatur lebur material. Pada waktu proses *sintering* terjadi perpindahan atom secara difusi sehingga serbuk akan menyatu dan pori-pori antar serbuk akan mengecil. Setelah proses *sintering*, produk akan menyusut sehingga dimensi produk akan berkurang 12-20% tergantung dari komposisi serbuk dan pengikatnya. Berat jenis produk setelah

sintering adalah 97-99.5% dari berat jenis material. Sifat kimia dan mekanik dari produk *MIM* dapat dibandingkan dengan material hasil tempa (*wrought material*) (Virhdian and Pujiyanto 2014).

Raw Material

Serbuk logam yang digunakan pada proses *MIM* umumnya berukuran $\leq 45\mu\text{m}$ (Heaney 2012), dimana penggunaannya tergantung pada *melting temperature*, reaktivitas partikel, ukuran partikel, bentuk partikel, kandungan paduan, kemurnian dan harganya (German 2011). Berikut beberapa contoh serbuk logam *MIM* yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Contoh serbuk logam yang biasa digunakan di *MIM* (German 2011)

material	nominal composition, w/o	fabrication method	median particle size, μm	apparent density, g/cm^3
copper	99.5 Cu	water atomization	14	3.3
iron	98.3 Fe	carbonyl decomposition	4	2.6
steel	Fe-0.9 C	carbonyl decomposition	5	2.7
molybdenum	99.8 Mo	oxide reduction	3	2.1
nickel	99.8 Ni	carbonyl reduction	8	3.6
316L stainless	Fe-19 Cr-9 Ni-2 Mo	gas atomization	11	4.1
630 stainless*	Fe-17 Cr-4 Ni-4 Cu	water atomization	20	3.3
titanium 6-4	Ti-6 Al-4 V	gas atomization	32	2.1
tool steel	Fe-12 Cr-1.5 C	gas atomization	11	4.3
tungsten	99.5 W	oxide reduction	2	3.0

*commonly designated 17-4 PH stainless steel

Binder biasanya terdiri dari beberapa jenis polimer yang berfungsi sebagai penjaga bentuk (*shape retention*) selama *debinding*, *low viscosity material* untuk menurunkan viskositas, dan sedikit zat aditif untuk meningkatkan *wetability* campuran. *Binder* sangat berpengaruh pada kerapatan partikel, aglomerasi, rheologi, pencetakan, *debinding*, akurasi dimensi, cacat, dan komposisi kimia produk akhir (Enneti, R.K 2012) seperti yang terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Contoh binder yang biasa digunakan di *MIM* (German 2011)

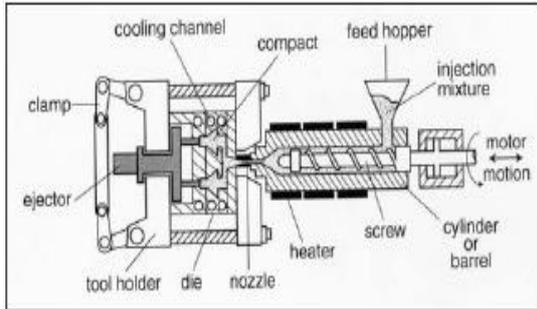
Binder Material	η_0 , Pa.s	E, kJ/mol	T_0 , K	Melting $^{\circ}\text{C}$
Parafin Wax	0.009	4.4	373	60
Carnauba Wax	0.021	12.3	383	84
PE Wax	0.81	19	383	>100
PP	420	33	503	140-200
Stearic acid	0.007		383	74

Proses Mixing

Mixing merupakan proses pencampuran serbuk dan *binder* kemudian digranulasi menjadi pelet dengan ukuran sekitar 5-7 mm. Campuran serbuk dengan *binder* yang berbentuk pelet inilah yang disebut dengan *feedstock*, yang kemudian digunakan sebagai bahan baku pada mesin *injection molding*. Perbandingan jumlah serbuk dengan *binder* tergantung pada jenis *binder*, jenis logam, bentuk dan ukuran serbuk. Rasio perbandingan umumnya sekitar 60% serbuk logam membutuhkan sekitar 40% *binder*. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses pencampuran (*mixing*) yaitu waktu *mixing*, temperatur *mixing*, ukuran serbuk, bentuk dan distribusi serbuk, formulasi *binder*, laju geser dan *powder loading* (Enneti, R.K 2012, Supati dkk 2014, Hossain et al. 2015). Keseragaman ukuran serbuk juga sangat menentukan karena keseragaman ukuran serbuk menentukan kepadatan (*packing density*) yang sangat berpengaruh pada pengurangan viskositas *feedstock* (Heaney 2012).

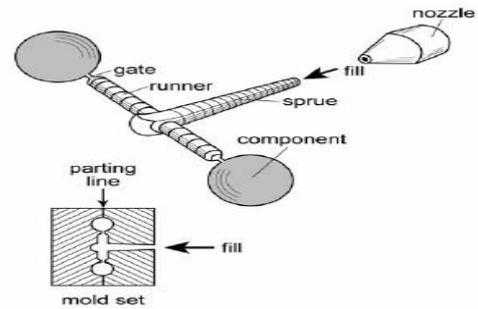
Proses Injection Molding

Proses *Injection Moulding* bertugas mengkonversi *feedstock* melalui cetakan menjadi bentuk produk dengan komponen mesin *Injection Moulding* seperti yang terlihat pada gambar 2. Pembuatan cetakan dirancang lebih besar dari ukuran sebenarnya. Hal ini dilakukan untuk mengkompensasi penyusutan produk setelah proses *sintering*.



Gambar 2. Komponen mesin injeksi (German 2011)

Selama proses pencetakan butiran/pelet *feedstock* disimpan di ruang temperatur kamar sebelum masuk ke dalam *hopper*. *Hopper* merupakan alat untuk memasukkan *feedstock* ke *barrel* yang telah dipanaskan. Di dalam barrel terdapat sebuah sekrup (*screw*) internal yang berfungsi mengaduk, mengompresi, dan melelehkan *feedstock*. Lelehan *feedstock* tersebut kemudian didorong ke dalam rongga cetak melalui *nozel* oleh *feeding screw*. *Feeding screw* harus dalam keadaan panas agar *feedstock* mencair dan teraduk untuk memastikan homogenitas dan tidak ada gelembung udara yang terperangkap. *Feeding screw* harus berbentuk lancip yang dapat memampatkan *feedstock* yang telah panas untuk membuang setiap udara yang terjebak. Pada daerah akhir *nozzel*, *feedstock* yang meleleh sebelum mengisi rongga cetak sampai penuh terlebih dahulu masuk melalui *sprue*, *runner* dan *gate* seperti yang terlihat pada Gambar 3. Temperatur maksimum pada cetakan biasanya di bawah 190°C. Selama proses pembekuan dalam rongga cetak, tekanan masih tetap ditahan untuk mempertahankan tekanan dalam cetakan produk. Tekanan maksimum cetakan bervariasi tergantung dengan bentuk geometri, berkisar antara 1,4 Mpa - 60 MPa (200 - 8.500 psi). Dalam beberapa situasi, pencetakan dapat dilakukan pada tekanan rendah yaitu sekitar 0,3 MPa (45 psi) (German 2011). Setelah produk membeku, cetakan dibuka dan produk mentah (*green part*) dikeluarkan dari rongga cetak dengan bantuan *ejector pin*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Seringkali bekas *ejector pin* ini masih dapat dilihat pada produk akhir.



Gambar 3. Gambar bagian *sprue*, *runner* dan *gate* (German 2011)



Gambar 4. Gambar bagian *sprue*, *runner*, *gate* dan cetakan komponen otomotif (German 2011)

Proses *Debinding*

Proses *debinding* adalah proses penghilangan *binder* (pengikat) dari dalam produk mentah atau *green part*. *Debinding* dapat dilakukan dengan dengan cara kimiawi (*solvent debinding*) dan perlakuan panas (*thermal debinding*), tapi umumnya lebih mudah dilakukan dengan *thermal debinding*. Prinsip *thermal debinding* yaitu menguapkan komponen *binder* (pengikat) dengan memanaskan dan menahannya dalam jangka waktu tertentu pada temperatur sedikit di atas temperatur dekomposisi komponen *binder* (pengikat) tersebut. Setiap formulasi dari *binder* (pengikat) memerlukan perlakuan pemanasan yang berbeda-beda sesuai dengan komponen penyusunnya. Lamanya waktu penahanan pada setiap tingkat pemanasan tergantung pada ukuran produk. Pada akhir proses *debinding* haruslah merupakan proses pra-sinter sehingga sudah mulai terjadi ikatan antar partikel untuk mempertahankan bentuk produk. *Thermal debinding* tidak dilakukan dengan pemanasan pada satu temperatur tinggi karena dapat menyebabkan *binder* (pengikat) terdekomposisi menjadi karbon sehingga sulit dikeluarkan dari badan produk. *Binder* (pengikat) pada proses *MIM* berbasis lilin tetapi telah banyak sistem pengikat yang berbeda yang dikembangkan.

Proses Sintering

Proses sintering merupakan proses pemanasan yang bertujuan untuk membentuk ikatan atomik antar partikel. Proses ini menghasilkan produk dengan densitas tinggi (95-99%) dengan porisitas pada produk mencapai 1-5%. Penyusutan ukuran yang cukup besar terjadi pada proses sintering yaitu sekitar 12-20%. Temperatur pada proses sintering tergantung jenis *feedstock* yang digunakan. Sintering dilakukan pada atmosfer tertentu dengan mempertimbangkan kemungkinan terjadinya proses yang timbul seperti oksidasi dan reduksi. Gas Argon, Hidrogen dan Nitrogen merupakan gas yang digunakan untuk melindungi produk dari oksidasi. Gas karbondioksida, disosiasi amonia dan disosiasi gas alam merupakan gas reduktor yang mampu mereduksi oksida di permukaan produk. Faktor penting dari proses sintering adalah tingkat pemanasan, waktu sintering, temperatur sintering dan atmosfer sintering. Faktor-faktor ini dapat mempengaruhi struktur mikro, ukuran, porositas, tingkat kepadatan akhir dan kandungan nitrogen akhir dari produk.

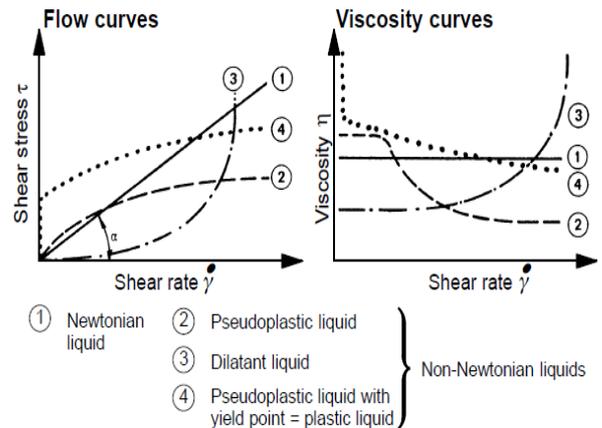
Sifat Rheologis Lelehan Feedstock

Pengisian rongga cetak pada proses MIM ditentukan oleh karakteristik rheologi *feedstock*, yaitu kemampuan lelehan *feedstock* untuk mengalir (*pourability*), menyebar (*spreadability*) dengan merata ke seluruh bagian rongga cetakan serta memiliki kemampuan untuk di injeksi (*syringability*). *Feedstock* memiliki beberapa persyaratan yaitu:

1. Rasio perbandingan serbuk yang dibuat disesuaikan dengan volume/kapasitas *mixer*.
2. Memiliki hasil pencampuran yang homogen (nilai torsi yang stabil pada proses pencampuran).
3. Laju geser yang digunakan selama proses injeksi berkisar antara 100-10000 s⁻¹ dengan viskositas maksimum sebesar 1000 Pa.s. (Supati dkk 2014).
4. *Binder* mudah dihilangkan pada proses *debinding* tanpa merusak produk (Liu dkk 2001).

Feedstock pada proses MIM pada umumnya menggunakan *Non Newtonian liquids* yaitu jenis pseudoplastik. Perilaku pseudoplastik dapat dilihat melalui nilai viskositas yang mengindikasikan mampu alir *feedstock*. Pada Gambar 5 dapat ditunjukkan perbedaan

beberapa karakter viskositas cairan Non Newtonian.



Gambar 5. Kurva aliran (*flow curves*) dan kurva viskositas *Non Newtonian liquids* (Schramm 2000)

Sifat rheologi yang paling penting pada proses MIM adalah viskositas. Viskositas merupakan sifat yang menggambarkan hubungan antara tegangan geser (*shear stress*) dan laju geser (*shear rate*). Untuk menghasilkan produk MIM yang bebas cacat maka viskositas diatur dalam rentang nilai tertentu (Khakbiz, dkk 2005). Nilai viskositas yang rendah mengindikasikan *feedstock* mudah mengalir, seiring meningkatnya laju geser cairan (Hossain dkk 2015). Viskositas cairan dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel, bentuk partikel dan massa jenis serbuk. Penambahan aditif seperti *lubricant* dan *plasticisers* dapat digunakan untuk mengurangi nilai viskositas cairan (Omar 2001).

Menurut Bousmina dkk, untuk mencari nilai *shear rate* dan nilai viskositas dapat digunakan analogi sederhana Couette untuk setiap silinder dan kemudian menghitung torsi keseluruhan yang diberikan oleh dua silinder pada cairan campuran. Pengaruh *aperture* yang ada antara dua set silinder diabaikan. Maka didapat persamaan sebagai berikut (Bousmina, dkk 1999) :

$$\dot{\gamma} = 16 \pi N \frac{\beta^2}{(1+\beta)^2(\beta^2-1)} \approx 2\pi N / \ln(\beta) \dots\dots(1)$$

dimana $\dot{\gamma}$ = *Shear rate* (s⁻¹), N = *Rotor rotation* (rpm), β = *Ratio of the mixing chamber*

Viskositas *feedstock* dapat dihitung dengan persamaan (Bousmina, dkk 1999):

$$\eta = \frac{T}{N} \frac{(\beta^2 - 1)}{8\pi^2 L R_c^2 (1 + g^2)} \dots \dots \dots (2)$$

dimana, η = Viskositas (Pa.s), T = *mixing torque* (N.m), L = Panjang rotor (m), g = *gear ratio* N_2/N_1 , R_c = Diameter Rotor

Kestabilan sifat rheologi *feedstock* merupakan penentu keberhasilan pada proses *MIM*, yang umumnya diketahui melalui analisis rheologi (Karatas, C., dkk 2004)(Krauss, V.A., dkk 2005). Beberapa penelitian yang telah dilakukan lebih difokuskan pada penelitian mengenai karakteristik sifat rheologi *feedstocks* melalui laju geser dan viskositasnya. Menurut Huang (Huang, B., dkk 2003) pemilihan sistem pengikat (*binder*) pada *feedstocks* dengan serbuk Fe/Ni dapat dilihat kestabilannya dari hubungan antara laju geser dan temperatur terhadap perilaku rheologinya, yaitu viskositas *feedstock*. Menurut Karatas (Karatas, C., dkk 2004) dengan mempelajari sifat rheologi *feedstock* keramik menggunakan bahan baku polyethylene (PE) dan 3 (tiga) *waxes* (carnauba, *bees wax* dan paraffin) serta serbuk steatite, dapat ditarik kesimpulan bahwa formulasi *feedstock* telah berhasil dibuat sesuai dengan persyaratan dalam proses *MIM*. Kondisi ini diindikasikan dengan nilai *flow behavior index* (n) memiliki nilai kurang dari 1 menunjukkan adanya perilaku pseudo-plastic pada cairan.

Menurut Khakbiz (Khakbiz, M., dkk 2005) untuk mengevaluasi pengaruh penambahan TiC pada serbuk SS316L sebagai bahan baku *feedstock*, terhadap perilaku rheologi dan kestabilannya, dapat dilihat melalui *capillary rheometer*. Mereka menyimpulkan bahwa perilaku rheologi sangat tergantung pada komposisi campuran. Penambahan partikel TiC pada partikel serbuk *stainless steel* mempengaruhi viskositas *feedstock* pada laju geser yang rendah $< 500 \text{ s}^{-1}$.

Menurut penelitian yang dilakukan Krauss (Krauss, dkk 2005) ketidakstabilan *feedstock* akan meningkat terutama pada penambahan serbuk dalam jumlah yang besar. Adanya peningkatan laju geser dan temperatur akan berakibat pada menurunnya nilai viskositas sehingga ketidakstabilan *feedstock* dapat

diatasi. Penggunaan *capillary rheometer* dalam penelitian ini dapat menganalisis perilaku rheologi *feedstock* dari bahan baku serbuk alumina yang terdiri dari *polyethylene glycol* (PEG), *polyvinylbutyral* (PVB) dan *stearic acid* (SA) dengan jumlah penambahan serbuk yang berbeda. Beberapa *feedstock* menunjukkan perilaku pseudo-plastik ($n < 0$) dan viskositas menunjukkan ketergantungan yang tinggi terhadap laju gesernya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *feedstock* yang memiliki *powder loading* yang rendah memiliki perilaku rheologi yang baik.

Menurut hasil penelitian yang dilakukan oleh Faiz Ahmad (Ahmad 2005) mempelajari sifat aliran dari campuran komposit yang terdiri dari serbuk aluminum dan serat gelas yang dicampurkan dengan *binder* plastik. *Powder loading* yang optimum adalah kondisi dimana viskositas campuran komposit menurun seiring peningkatan laju gesernya. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh *powder loading* dan ukuran partikel serbuk pada *feedstock* SS316L terhadap perilaku rheologi dan kemampuan *feedstock* untuk dicetak.

Menurut penelitian yang dilakukan Herranz (Herranz dkk. 2005) formulasi baru *feedstock* dengan bahan baku *binder high density polyethylene* (HDPE) dan *paraffin wax* (PW) dikembangkan untuk memproduksi komponen M2 *high speed steel* menggunakan mesin *metal injection moulding*. Pencampuran yang homogen (*miscible*) antara kedua *binder* telah dianalisis menggunakan *dynamomechanical thermal analysis* (DMTA). Dari pengukuran viskositas dari campuran kedua *binder* yang berbeda pada laju geser yang berbeda. Kondisi ini menunjukkan formulasi yang optimum untuk proses *MIM* yaitu pada penggunaan 50% HDPE. Dari pengukuran torsi pada campuran terlihat pula bahwa maksimum rasio penggunaan serbuk yang digunakan yaitu sekitar 70%.

Menurut Liu (Liu, dkk 2001) untuk pembuatan komponen yang berukuran mikro telah dilakukan penelitian formulasi komposisi dengan menggunakan sistem *binder* multi komponen yaitu *Paraffin Wax* (PW), *Ethylene Vinyl Acetate* (EVA) dan *High Density Polyethylene* (HDPE). Dalam penelitian ini ditunjukkan bahwa penggunaan

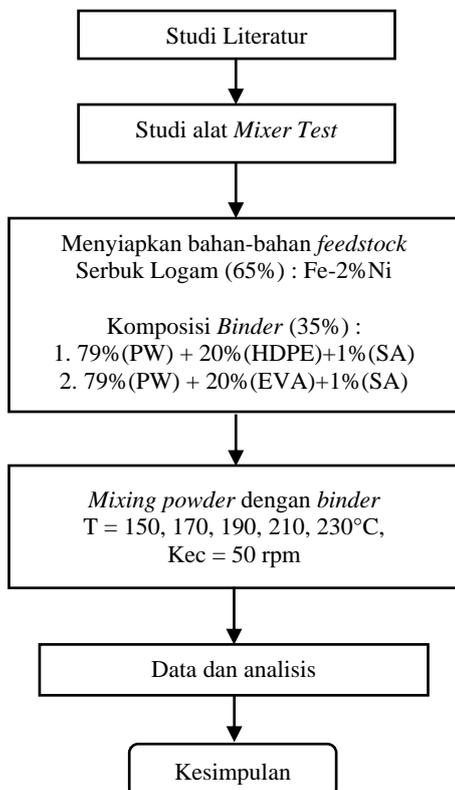
serbuk *stainless steel* 316L dengan ukuran 100x100x250 μm telah berhasil dicetak, *debinding* dan disinter dengan baik dengan formulasi sistem *binder* 20 wt.% (PW) + 40 wt.% (EVA) + 40 wt.% (HDPE) *binder*.

Dapat disimpulkan dari beberapa penelitian bahwa kandungan serbuk logam terlalu banyak akan menyebabkan viskositas bahan baku terlalu tinggi dan mengakibatkan kegagalan injeksi molding. Perilaku rheologi *feedstocks* sangat tergantung pada komposisi campuran sehingga adanya peningkatan laju geser dan temperatur akan berakibat pada menurunnya nilai viskositas. Berdasarkan beberapa penelitian tersebut maka dilakukan penelitian ini untuk mengetahui karakteristik rheologi *feedstock* melalui nilai laju geser dan viskositasnya, dengan menggunakan bahan baku serbuk Fe2%Ni dengan 2 (dua) jenis pengikat (*binder*) *High-Density Polyethylene (HDPE)* dan *Ethylene Vinyl Acetate (EVA)* dalam memenuhi syarat rheologi sebagai *feedstock Metal Injection Molding*.

METODOLOGI

Flowchart Pembuatan

Tahap-tahap pelaksanaan pembuatan *feedstock* menggunakan *mixer test* dilakukan dalam beberapa tahap sebagaimana yang dijelaskan dalam flowchart Gambar 6.



Gambar 6. Flowchart pembuatan

Powder

Powder yang digunakan adalah *Powder Fe2%Ni* merk *Epson Atmix Corporation* untuk masing-masing *feedstock*.

Binder

Binder yang digunakan ada 2 jenis untuk masing-masing *feedstock* yaitu:

1) Feedstock 1

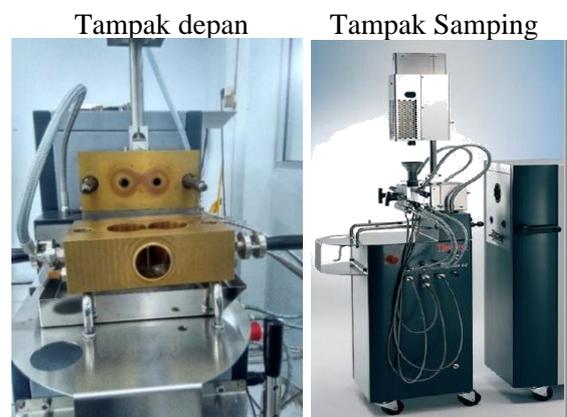
Parafin Wax (PW) 79% + High-Density Polyethylene (HDPE) 20% + Steric Acid (SA) 1%.

2) Feedstock 2

Parafin Wax (PW) 79% + Ethylene Vinyl Acetate (EVA) 20% + Steric Acid (SA) 1%.

Mixer Test

Beragamnya perangkat *mixer* memungkinkan metode pencampuran yang berbeda akan tetapi pencampurannya harus homogen dan memiliki perilaku *pseudo-plastik*. Pada penelitian ini digunakan *Polylab Rheo Testmixer 3000* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Spesifikasi *Polylab Rheo Testmixer 3000* ditunjukkan pada Tabel 5. Jenis *mixer rotor roller blade* ini memiliki cara kerja yang sama dengan *twin cam mixer* yaitu *mixer* yang bergerak berlawanan arah jarum jam. Temperatur yang digunakan pada proses *mixing* adalah 150, 170, 180, 190, 210, 230°C. Kecepatan rotor konstan 50 rpm dengan rasio perbandingan antara *powder* dan *binder* adalah 80% dari volume (volume total ruang adalah 310 cm³). Temperatur dan torsi pencampuran dimonitor sebagai output parameter.



Gambar 7. Alat *mixer Polylab Rheo Testmixer 3000*

Tabel 5. Spesifikasi alat mixer Polylab RheoTestmixer 3000

Item	Rheomix 3000
Chamber Volume	625 cm ³
With Rotor	310 – 541 cm ³
Material	Stainless Steel DIN 1.4301
Gear ration	3:2 (optional 2:3)
Max. Speed	250 min ⁻¹
Max. Torque	300 Nm
Max. Temperature	400°C
Temperature Control	3 zones electric heating and air cooling

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penentuan Berat Feedstock

Rasio perbandingan komposisi yang dilakukan adalah 65% powder Fe-2%Ni, 35% binder dengan volume Chamber 160 cm³. Berikut Persamaan 3 dan 4 yang digunakan untuk perhitungan komposisi volume powder dan binder yang digunakan serta karakteristik binder seperti yang ditunjukkan pada Tabel 6:

Perhitungan Berat Powder

$$m_{\text{Powder Fe2Ni}} = \rho_{\text{powder Fe2Ni}} \times V_{\text{Chamber}} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana m= Massa (g), ρ= Massa Jenis g/cm³ dan V= Volume (cm³)

Perhitungan Berat Binder

$$\text{Volume Binder} = \frac{\text{Vol Binder} \times \text{Vol chamber}}{\text{Vol Powder}} \dots (4)$$

Tabel 6. Karakteristik komponen binder

Komponen	Struktur Kimia	T _m (°C)	ρ (g/cm ³)
PW	C _n H _{2n+2}	58	0,9
HDPE	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	139	0,96
EVA	$\text{---}[\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COCH}_3]_x$ $\text{---}[\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COCH}_3]_y$	80	0,96
SA	CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COOH	66	0,96

Persamaan 5 dan 6 digunakan untuk perhitungan komposisi feedstock 1 dan 2, sebagai berikut:

Perhitungan Komposisi Feedstock

$$\rho_{\text{Binder}} = \frac{((79\% \times \rho_{\text{paraffin wax}}) + (20\% \times \rho_{\text{HDPE/EVA}}) + (1\% \times \rho_{\text{SA}}))}{100} \dots (5)$$

$$m_{\text{Binder}} = \rho_{\text{Binder}} \times V_{\text{chamber}} \dots \dots \dots (6)$$

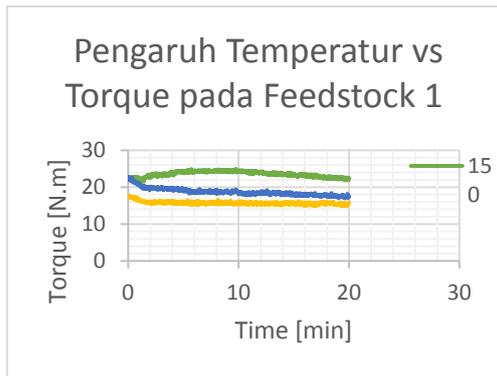
Proses mixing dilakukan dengan kecepatan 50 rpm. Berikut data rata-rata torque pada komposisi feedstock 1 dan 2 seperti ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Data rata-rata torque pada komposisi feedstock 1 dan 2

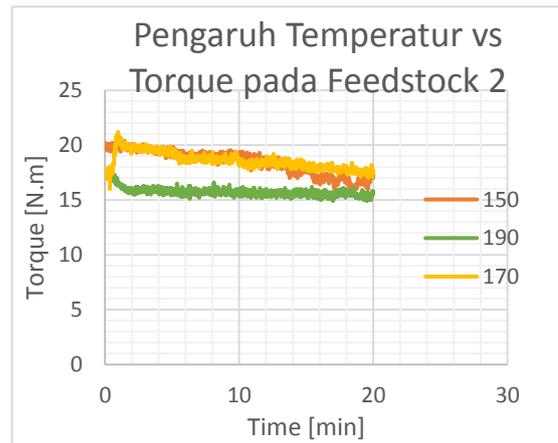
Kode Sampel	Temp (°C)	Speed (rpm)	Mean Torque (N.m)
79%(PW) + 20%(HDPE)+1%(SA)	150	50	23.52
	170	50	18.73
	190	50	15.75
	210	50	14.00
	230	50	13.29
79%(PW) + 20%(EVA)+1%(SA)	150	50	18.85
	170	50	18.57
	190	50	15.75
	210	50	14.00
	230	50	13.29

B. Analisa Grafik pada Feedstock 1

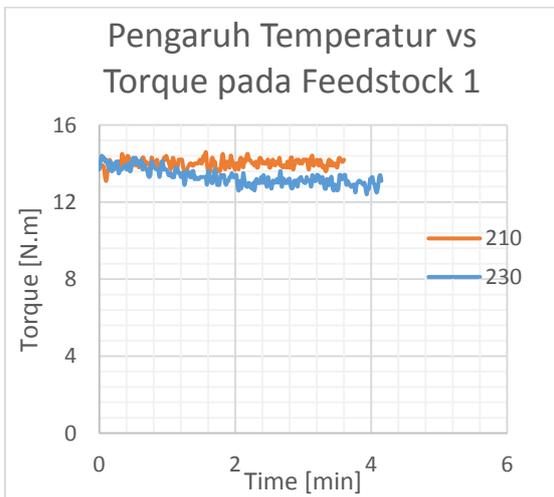
Pada Gambar 8 dan 9 terlihat grafik feedstock 1 mengalami penurunan nilai torsi seiring dengan peningkatan temperatur mixing (pencampuran). Semakin tinggi temperatur mixing (pencampuran) maka semakin turun nilai torsi. Penurunan nilai torsi pada temperatur 150°C, 170°C, 190°C terjadi karena semakin banyak HDPE yang melebur meskipun belum sampai hangus terbakar. Sementara pada temperatur 210°C dan 230°C semakin banyak HDPE yang mulai terbakar atau terdegradasi akibat dipanaskan melebihi temperatur leburnya yaitu 129°C (Liu et al. 2001). Kondisi tersebut akan mempengaruhi nilai torsi yang dihasilkan.



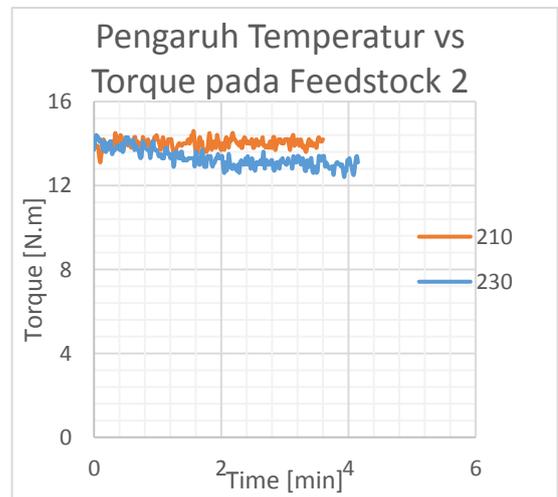
Gambar 8 Grafik *Feedstock 1* pada temperatur 150°C, 170°C dan 190°C



Gambar 10. Grafik *Feedstock 2* pada temperatur 150°C, 170°C dan 190°C



Gambar 9. Grafik *Feedstock 1* pada temperatur 210°C dan 230°C



Gambar 11. Grafik *Feedstock 2* pada temperatur 210°C dan 230°C

C. Analisa Grafik pada *Feedstock 2*

Pada Gambar 10 dan 11 terlihat grafik *feedstock 2* mengalami penurunan nilai torsi seiring dengan peningkatan temperatur *mixing* (pencampuran). Semakin tinggi temperatur *mixing* (pencampuran) maka semakin turun nilai torsi. Penurunan nilai torsi pada temperatur 150°C, 170°C, 190°C terjadi karena semakin semakin tinggi temperatur *mixing* (pencampuran) maka semakin banyak EVA yang melebur meskipun EVA belum sampai hangus terbakar. Sementara pada temperatur 210°C dan 230°C semakin banyak EVA yang mulai terbakar atau terdegradasi akibat dipanaskan melebihi temperatur leburnya yaitu 85°C (Liu et al. 2001). Kondisi tersebut akan mempengaruhi nilai torsi yang dihasilkan.

D. Data Laju Geser (*Shear Rate*) dan Viskositas

Perhitungan *shear rate*

Untuk mengetahui laju geser (*shear rate*) digunakan persamaan sebagai berikut (Bousmina, dkk 1999):

$$\dot{\gamma} = 16 \pi N \frac{\beta^2}{(1+\beta)^2(\beta^2-1)} \approx 2\pi N / \ln(\beta) \dots\dots(1)$$

dimana $\dot{\gamma}$ = Shear rate (s^{-1}), N = Rotor rotation (rpm), β = Ratio of the mixing chamber

Perhitungan viskositas

Viskositas *feedstock* dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Bousmina, dkk 1999) :

$$\eta = \frac{T}{N} \frac{(\beta^2 - 1)}{8\pi^2 L R_c^2 (1 + g^2)} \dots\dots\dots(2)$$

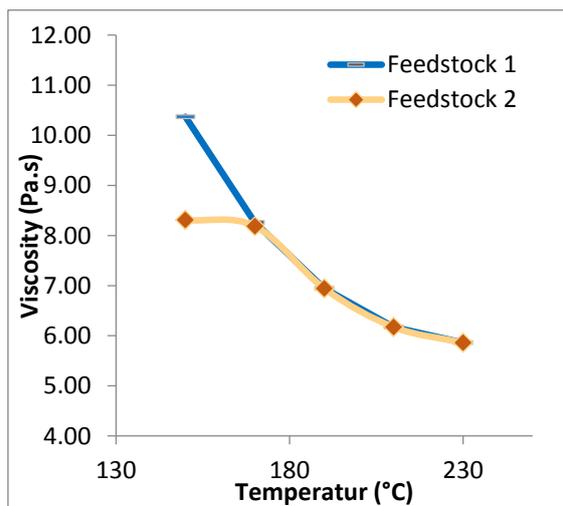
Dimana, η = Viskositas (Pa.s), T = mixing torque (N.m), L = Panjang rotor (m), g = gear ratio N_2/N_1 , R_c = Diameter Rotor

Dari hasil perhitungan dengan persamaan 1 dan 2 didapatkan data seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Data Laju Geser (*Shear Rate*) dan Viskositas

Kode	Temp (°C)	Torsi Rata-Rata (N.m)	Kec (rpm)	Laju Geser (s ⁻¹)	Viskositas (Pa.s)
79%(PW) + 20%(HDPE) +1%(SA)	150	23.52	50	2020.83	10.37
	170	18.73	50	2020.83	8.26
	190	15.75	50	2020.83	6.94
	210	14.00	50	2020.83	6.17
	230	13.29	50	2020.83	5.86
79%(PW) + 20%(EVA)+ 1%(SA)	150	18.85	50	2020.83	8.31
	170	18.57	50	2020.83	8.19
	190	15.75	50	2020.83	6.94
	210	14.00	50	2020.83	6.17
	230	13.29	50	2020.83	5.86

E. Analisis Grafik Laju Geser (*Shear Rate*) dan Viskositas



Gambar 12. Grafik hubungan antara temperatur dan viskositas *feedstock* 1 dan 2

Pada grafik diatas terlihat bahwa semakin tinggi laju geser (*shear rate*) dan temperatur *mixing* maka semakin menurun viskositas yang dimiliki *feedstock*. Hal tersebut menandakan bahwa lelehan *Feedstock* 1 (79%PW+20%HDPE+1%SA) dan *feedstock* 2 (79%PW + 20%EVA+1%SA) termasuk jenis fluida non-newtonian yang bersifat *pseudoplastic*. Penurunan viskositas akibat kenaikan tegangan geser, terjadi karena adanya mekanisme pengadukan yang menyebabkan polimer tidak saling bertautan. Semakin tinggi kecepatan pengadukan maka polimer dalam hal ini pengikat (*binder*) menempatkan dirinya pada arah yang diberikan oleh *mixer*. Kondisi ini menimbulkan terjadinya *internal resistance* pada fluida sehingga viskositas mengalami penurunan.

Seperti pada penelitian yang dilakukan Krauss (Krauss, dkk 2005) adanya peningkatan laju geser dan temperatur akan berakibat pada menurunnya nilai viskositas sehingga ketidakstabilan *feedstock* dapat diatasi.

Pembuatan formulasi *Feedstock* 1 (79%PW+20%HDPE+1%SA) dan *Feedstock* 2 (79%PW + 20%EVA + 1%SA) telah sesuai dengan syarat karakteristik rheologi *feedstock* untuk proses *metal injection molding*. Hal ini terlihat dari nilai laju geser (*shear rate*) yang dihasilkan pada *Feedstock* 1 (79%PW +20%HDPE + 1%SA) dan *Feedstock* 2 (79%PW + 20%EVA + 1%SA) masih berada dalam rentang laju geser yang dipersyaratkan dalam proses injeksi yaitu antara 100-10000 s⁻¹ (Supati, dkk 2000). Nilai tersebut sangat dipengaruhi oleh kecepatan dan temperatur pencampuran *mixing*. Nilai viskositas pada *Feedstock* 1 (79%PW +20%HDPE + 1%SA) dan *Feedstock* 2 (79%PW + 20%EVA + 1%SA) memiliki viskositas dibawah 1000 Pa.s. Hal ini menunjukkan viskositas pada *feedstock* 1 dan 2 memiliki viskositas yang sesuai dengan viskositas yang dipersyaratkan dalam proses *MIM*. Nilai viskositas sangat dipengaruhi oleh nilai rata-rata torque dan laju geser (*shear rate*) yang dihasilkan *feedstock*. Nilai viskositas yang rendah mengindikasikan *feedstock* mudah mengalir, seiring meningkatnya laju geser cairan (Hossain dkk 2015).

Penggunaan sistem *binder* menggunakan *Paraffin Wax (PW)*, *Ethylene Vinyl Acetate (EVA)* dan *High Density Polyethylene*

(HDPE) telah dilakukan pula oleh Liu (Liu, dkk 2001) yang menyatakan bahwa formulasi komposisi menggunakan sistem binder multi komponen yaitu *Paraffin Wax (PW)*, *Ethylene Vinyl Acetate (EVA)* dan *High Density Polyethylene (HDPE)* dengan serbuk *stainless steel 316L* telah berhasil dicetak, *debinding* dan disinter dengan baik. Dengan formulasi sebagai berikut: 20 wt.% (PW) + 40 wt.% (EVA) + 40 wt.% (HDPE).

Penggunaan serbuk FeNi juga dilakukan penelitian oleh Huang (Huang, B., dkk 2003) yang menyatakan bahwa pemilihan sistem pengikat (*binder*) pada *feedstocks* dengan serbuk Fe/Ni dapat dilihat kestabilannya dari hubungan antara laju geser dan temperatur terhadap perilaku rheologinya, yaitu viskositas *feedstock*.

KESIMPULAN

Berdasarkan proses pembuatan *Feedstock* dan analisis yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan yaitu:

- 1) Nilai rata-rata torsi pada *Feedstock 1* dan *2* akan terus menurun seiring dengan meningkatnya temperatur *mixing* (pencampuran).
- 2) Peningkatan temperatur *mixing* (pencampuran) menyebabkan HDPE & EVA akan lebur dan lambat laun akan hilang (terdekomposisi) karena melebihi suhu leburnya.
- 3) Nilai rata-rata torsi *Feedstock 1* memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan nilai rata-rata torsi *Feedstock 2*.
- 4) Komposisi binder pada *Feedstock 1* dan *2* telah sesuai dengan syarat karakteristik rheologi *feedstock* yang alirannya bersifat *pseudoplastic*.
- 5) Nilai laju geser (shear rate) yang dihasilkan pada *Feedstock 1* dan *2* masih berada dalam rentang laju geser yang dipersyaratkan dalam proses injeksi yaitu antara 100-10000 s^{-1} .
- 6) Nilai viskositas pada *Feedstock 1* dan *2* memiliki viskositas yang sesuai dengan viskositas yang dipersyaratkan dalam proses *MIM*.
- 7) Karakteristik rheologi *Feedstock 1* dan *2* telah memenuhi syarat rheologi sebagai *feedstock Metal Injection Molding* melalui nilai laju geser dan viskositasnya, sehingga dapat menjadi studi awal dalam memproduksi *feedstock* di dalam negeri untuk mengurangi

ketergantungan kita terhadap bahan baku impor.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, Faiz. 2005. "Rheology of Metal Compositivity Mixes for Powder Injection Molding." *International Journal of Powder Metallurgy* Vol. 41, N: 43–48.
- Bousmina, M., A. Ait-Kadi, and J. B. Faisant. 1999. "Determination of Shear Rate and Viscosity from Batch Mixer Data." *Journal of Rheology* 43 (2): 415–33. doi:10.1122/1.551044.
- Enneti, R.K, Dkk. 2012. "Powder Binder Formulation and Compound Manufacture in Metal Injection Moulding (MIM)."
- German, Randall M. 2011 *Metal Injection Moulding A Comprehensif MIM Design Guide*. New Jersey: Metal Powder Industries Federation.
- Heaney, D.F. 2012. "Designing For Metal Injection Moulding (MIM)," 30.
- Herranz, G, B Levenfeld, A Va, and J M Torralba. 2005. "Development of New Feedstock Formulation Based on High Density Polyethylene for MIM of M2 High Speed Steels." *Powder Metallurgy* 48 No 2: 134–38. doi:10.1179/003258905X37828.
- Hossain, Altab, Imtiaz Ahmed Choudhury, Nurun Nahar, Ismail Hossain, and Azuddin Bin Mamat. 2015. "Experimental and Theoretical Investigation of Powder–Binder Mixing Mechanism for Metal Injection Molding." *Materials and Manufacturing Processes* 30 (1): 41–46. doi:10.1080/10426914.2014.930955.
- Huang, B., Liang, S., and Qu, X. 2003. "The Rheology of Metal Injection Molding." *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 137: 132–37.
- Karatas, C., Kocer, A., Unal, H.I., and Saritas, S. 2004. "Rheological Properties of Feedstocks Prepared with Steatite Powder and Polyethylene-Based Thermoplastic Binders." *Journal of Materials Processing Technology* Vol 152: 77–83.
- Khakbiz, M., Simchi, A., and Bagheri, R. 2005. "Analysis of the Rheological Behavior

- and Stability of 316L Stainless Steel- TiC Powder Injection Molding Feedstock.” *Materials Science and Engineering A*, Pp. 105-113, 2005 Vol. 407,.
- Krauss, V. A., Pires, E. N., Klein, A. N., and Fredel, M.C. 2005. “Rheological Properties of Alumina Injection Feedstocks.” *Materials Research* Vol. 8: 187–89.
- Liu, Z Y, N H Loh, S B Tor, K A Khor, Y Murakoshi, and R Maeda. 2001. “Binder System for Micropowder Injection Molding.” *Elsevier*, no. March: 31–38.
- Omar, Mohd Afian. 2001. “The Influence of Stearic Acid on the Properties of Injection Moulding of Stainless Steel Powder.” *Journal of Technology* Vol. 10: 37–45.
- Schramm, Gebhard. 2000. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*. 2nd ed. Karlsruhe Jerman: Gabrueber haake GmbH.
- Supati, R, N H Loh, K A Khor, and S B Tor. 2000. “Mixing and Characterization of Feedstock for Powder Injection Molding Mixing and Characterization of Feedstock for Powder Injection Molding.” *Elsevier*, no. November: 109–14. doi:10.1016/S0167-577X(00)00151-8.
- Virdhian, Shinta, and Pujiyanto. 2014. “Pengembangan Komponen Near Net Shape Berbiaya Rendah Dengan Proses Metal Injection Molding Development of Low Cost Near Net Shape Parts.” *Jurnal Riset Industri Kemenperin*, no. Mim: 11–21.
- Khakbiz, M., Simchi, A. and Bagheri, R., “Analysis of the rheological behavior and stability of 316L stainless steel- TiC powder injection molding feedstock”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 407, pp. 105-113, 2005
- Mohd Afian Omar, “The influence of stearic acid on the properties of injection moulding of stainless steel powder” *Journal of Technology*, Vol. 10, Num. 2, pp.37-45,2001
- Karatas, C., Kocer, A., Unal, H.I., and Saritas, S., “Rheological properties of feedstocks prepared with steatite powder and polyethylene-based thermoplastic binders”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 152, pp. 77-83, 2004.
- Krauss, V. A., Pires, E. N., Klein, A. N., and Fredel, M.C., “Rheological properties of alumina injection feedstocks”, *Materials Research*, Vol. 8, Num. 2, pp. 187-189, 2005.
- Huang, B., Liang, S., and Qu, X., “The rheology of metal injection molding”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 137, pp. 132-137, 2003.