

PEMILIHAN BAHAN SUAPAN BAGI PROSES PENGACUAN SUNTIKAN LOGAM BERDASARKAN KEPADA KAJIAN SIFAT REOLOGI

NORHAMIDI MUHAMAD¹, KHAIRUR RIJAL JAMALUDIN^{2*}, SRI
YULIS M. AMIN³ & MOHD NIZAM AB. RAHMAN⁴

Abstrak. Sifat reologi bahan suapan acuan suntikan logam MIM yang disediakan dengan keluli tahan karat 316L pengabusan gas dan, *polymethyl methacrylate* (PMMA), polietelena glikol (PEG) dan asid sterik sebagai bahan pengikat telah dikaji. Dai kapilari $L/D = 10$ telah digunakan dalam kajian ini. Serbuk keluli tahan karat kasar dan halus telah diadunkan dengan bahan pengikat pada beban serbuk 64% dan 65% isipadu. Kesemua bahan suapan mempamerkan tingkahlaku pseudo plastik memandangkan indek tingkahlaku alirannya kurang daripada 1, tetapi indek tersebut berkadar songsang terhadap beban serbuk. Seterusnya, indek tingkahlaku bagi serbuk kasar didapati lebih besar berbanding serbuk halus. Bahan suapan 16_64 lebih peka berbanding bahan suapan yang lain, dan bahan suapan 31_65 pula didapati kurang peka terhadap suhu dan tekanan. Bagaimanapun, kepekaan juga didapati berkadar songsang terhadap beban serbuk. Maka, indek kebolehcacuan bagi 31_64 adalah yang terbaik, dan hasil kajian mendapati bahawa beban serbuk 64% isipadu menghasilkan kebolehcacuan bahan suapan yang lebih baik. Akhirnya, kajian ini menyimpulkan bahawa kesemua bahan suapan sesuai untuk disuntik ke dalam acuan kerana sifat reologinya menunjukkan penipisan ricih apabila tegasan ricih dikenakan terhadapnya. Bagaimanapun, bahan suapan pada beban serbuk 64% isipadu adalah yang lebih sesuai disebabkan oleh indek kebolehcacuan yang lebih tinggi daripada 65% isipadu.

Kata kunci: Pengacuan suntikan logam, reologi, indek tingkahlaku aliran, tenaga pengaktifan, indek kebolehcacuan

Abstract. Rheological properties of the metal injection molding (MIM) feedstock prepared with gas atomized 316L stainless steel and, polymethyl methacrylate (PMMA), polyethylene glycol (PEG) and stearic acid as binder have been investigated. Capillary rheometer with die of $L/D = 10$ was used in the investigation. Coarse and fine stainless steel powders were mixed with binders at powder loading of 64% and 65% volume. All feedstocks exhibit pseudo plastics behaviour as the flow behaviour indexes were less than one, but it is inversely proportional to the powder loading. Moreover, the flow behaviour index of the coarse powder is larger than the fine powder particles. Feedstock 16_64 exhibits higher sensitivity among other feedstocks while 31_65 was least sensitive to the temperature and pressure. However, the sensitivity was also

^{1,3&4} Kumpulan Penyelidikan Proses Persisan, Jabatan Kejuruteraan Mekanikal dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

² Jabatan Kejuruteraan Mekanikal, Kolej Sains dan Teknologi, Universiti Teknologi Malaysia, *City Campus*, 54100 Kuala Lumpur, Malaysia

* Penulis utama: Email : khairur@citycampus.utm.my

inversely proportional to the powder loading. Thus, moldability index of the 31_64 is the best and result shows that powder loading 64% volume gives better moldability to the feedstocks. Finally, the investigation concluded that the feedstocks are suitable to be injection molded because the rheological properties demonstrate a shear thinning when subjected to shear stress. However, feedstock with the powder loading of 64% volume is the most suitable as the moldability index is higher than the 65% volume feedstocks.

Keywords: Metal injection molding, rheology, flow behaviour index, activation energy, moldability index

1.0 PENGENALAN

Pengacuan suntikan logam (MIM) merupakan satu proses yang kos efektif bagi menghasilkan produk logam yang bersaiz kecil, kompleks dan berkejituan tinggi. Aplikasi awal proses ini telah mula dilakukan ke atas seramik dan dilaporkan pada akhir 1920an [1] tetapi ianya mula menarik perhatian industri secara meluas selepas 1980an [2].

Proses ini bermula daripada penyediaan bahan suapan, penyuntikan, penyahikatan dan diakhiri dengan penyinteran. Penyediaan bahan suapan melibatkan pengadunan serbuk logam dengan bahan-bahan pengikatnya. Bahan pengikat ini terdiri daripada bahan polimer yang akan mengekalkan bentuk jasad anum (bahan teracu) setelah ianya dikeluarkan daripada acuan di samping memberikan sifat kebolehaliran kepada serbuk logam. Aspek penyediaan bahan suapan adalah proses yang terpenting dalam proses MIM [3].

Proses penyuntikan bahan suapan ini akan dilakukan dengan menggunakan mesin pengacuan suntikan logam. Semasa proses ini, sifat reologi bahan suapan adalah amat penting dan sebarang kelemahan sifat reologinya akan mempengaruhi kualiti jasad anum yang dihasilkan.

Sebelum disinter, bahan pengikat yang berada dalam jasad anum perlu dikeluarkan melalui proses penyahikatan. Terdapat dua kaedah penyahikatan, iaitu penyahikatan termal dan penyahikatan dua peringkat. Penyahikatan termal dilakukan di dalam relau dengan memanaskan jasad anum ke suhu lebur bahan pengikat sebelum ianya disinter.

Penyahikatan dua peringkat lazimnya dilakukan terhadap jasad anum yang dihasilkan dengan menggunakan bahan suapan yang menggunakan dua jenis bahan pengikat. Bahan pengikat tersebut dikenali sebagai bahan pengikat tulang belakang (primer) dan bahan pengikat boleh larut (sekunder). Penyahikatan yang pertama dilakukan adalah penyahikatan larutan di mana bahan pengikat sekunder akan dikeluarkan dengan menggunakan cecair seperti heptana ataupun air suling, diikuti dengan penyahikatan termal di dalam relau. Padatan yang telah dinyahikatan ini dikenali sebagai jasad perang.

Bagi memperolehi sifat kebolegunaan, jasad perang tersebut hendaklah disinter.

Proses ini adalah sama seperti yang dilakukan dalam proses metalurgi serbuk konvensional.

Kajian mengenai penyuntikan bahan suapan keluli tahan karat 316L yang menggunakan bahan pengikat PEG dan PMMA telah dikaji oleh Mohd Afian [4] dan mendapati bahawa bahan pengikat ini dapat digunakan bagi menghasilkan jasad akhir yang baik. Bagaimanapun, tiada kajian sifat reologi yang terperinci dilakukan oleh beliau.

Dalam kajian lain, bahan suapan yang sesuai dengan serbuk niobium telah dibangunkan oleh Aggarwal *et al.* [5]. Sifat-sifat reologi seperti kehomogenan bahan suapan, kesan suhu dan kesan kadar ricih terhadap kelikatan bahan suapan turut dikaji. Sifat reologi alumina yang diadunkan dengan PEG, polivinilbutiral (PVB) dan asid sterik telah dikaji oleh Krauss *et al.* [6]. Kajiannya mendapati bahawa bahan suapan yang mempunyai beban serbuk rendah menunjukkan sifat reologi yang lebih baik iaitu bahan suapan yang mempunyai beban serbuk 55% isipadu. Manakala, Yimin *et al.* [7] telah mengkaji mengenai kesan komposisi polimer yang berbeza ke atas sifat reologi, penahanan bentuk dan sifat mekanikal serta pengecutan dimensi jasad teracu yang dihasilkan oleh proses MIM ini.

Kertas kerja ini membincangkan mengenai pemilihan bahan suapan MIM yang baik berdasarkan sifat reologinya. Bahan suapan yang digunakan adalah serbuk keluli tahan karat kasar dan halus yang telah diadunkan dengan bahan pengikat; *polymethyl methacrylate* (PMMA), polietilena glikol (PEG) berketumpatan tinggi dan asid sterik (AS). Bahan-bahan pengikat yang digunakan ini telah dibebankan dengan serbuk keluli sebanyak 64% isipadu dan 65% isipadu. Kajian ini penting dalam membuat pemilihan bahan suapan yang berupaya menghasilkan jasad anam yang bebas daripada sebarang kecacatan.

2.0 KAEDAH EKSPERIMEN

2.1 Penyediaan Bahan Suapan

Serbuk keluli tahan karat 316L dari ANVAL dengan partikel serbuk purata (D_{50}) 19.606 dan 11.225 μm digunakan dalam kajian ini. Serbuk keluli yang digunakan dihasilkan dengan kaedah pengabusan gas yang menghasilkan partikel serbuk keluli berbentuk sfera. Komposisi kimia dan sifat serbuk keluli ini ditunjukkan dalam Jadual 1.

Adunan PMMA, PEG dan asid sterik digunakan sebagai bahan pengikat dengan nisbah 73% PEG; 25% PMMA; dan 2% asid sterik berdasarkan kepada peratusan isipadu. Bahan pengikat tersebut dicampur dengan serbuk keluli sebanyak 64% dan 65% isipadu, dan diadunkan dengan bahan pengikat mengikut urutan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1.

Nilai beban serbuk yang digunakan ini adalah berdasarkan kepada beban serbuk genting bagi bahan suapan yang sama yang telah dikaji oleh Muhammad Hussain *et al.* [8]. Kajiannya mendapati bahawa beban serbuk genting bagi serbuk logam keluli tahan karat SS361L pengatoman gas yang bersaiz purata 19.606 dan 11.225 μm masing-masing adalah 69.43% dan 69.51% isipadu. Bagaimanapun, German dan Bose [3] mencadangkan agar beban serbuk yang digunakan berada dalam julat 2% - 5% di bawah beban serbuk genting.

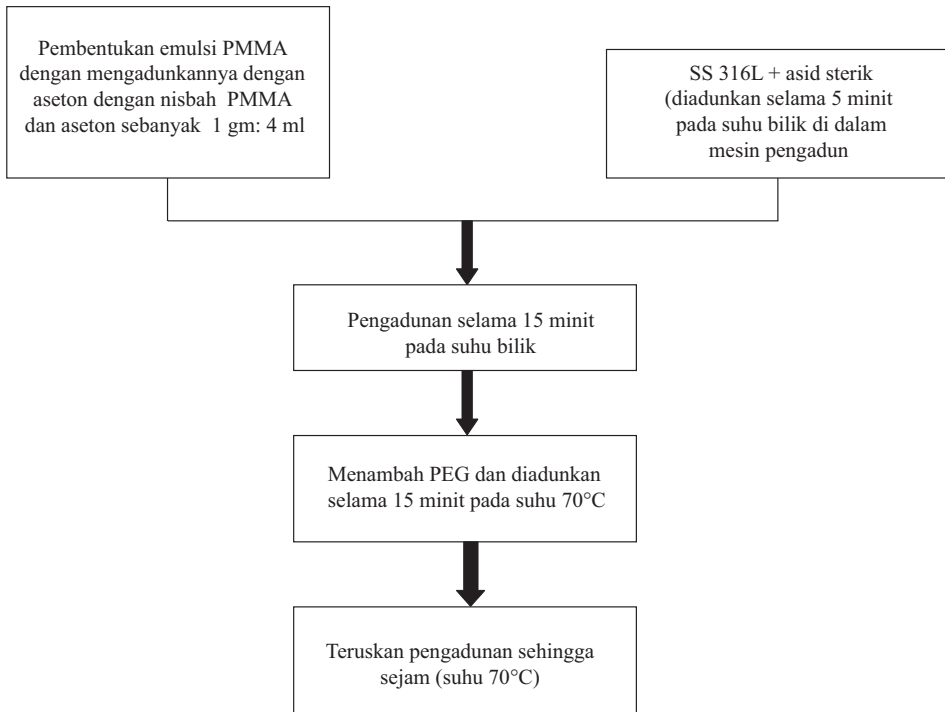
Jadual 1 Komposisi kimia serbuk keluli tahan karat (SUS 316L)

Pengenalan serbuk	SUS 316L
Sumber serbuk:	Anval 316 keluli tahan karat, Sweden
Komposisi kimia serbuk:	
% C	0.026
% Si	0.58 (0.36)
% Mn	1.43 (1.44)
% P	0.030 (0.01)
% S	0.012
% Cr	16.4 (16.11)
% Ni	10.4 (9.97)
% Mo	2.08 (1.92)

Adunan serbuk keluli tahan karat dengan bahan pengikat ini diadunkan selama 95 minit dengan menggunakan mesin pengadun jenis bilah sigma. Pada peringkat permulaan, emulsi PMMA akan disediakan dengan mengadunkan serbuk PMMA bersama aseton selama 15 minit. Pada masa yang sama, serbuk keluli diadunkan bersama-sama asid sterik pada suhu bilik oleh mesin pengadun selama 5 minit.

Seterusnya emulsi PMMA dimasukkan ke dalam mesin pengadun dan terus diadunkan bersama-sama adunan yang sedia ada dalam mesin pengadun selama 15 minit pada suhu bilik. Ini bertujuan untuk mengelak wujudnya aglomerat emulsi PMMA dan serbuk keluli tahan karat dalam adunan. Seterusnya PEG dimasukkan ke dalam mesin pengadun dan ianya diteruskan selama 75 minit pada suhu 70°C.

Akhir sekali, adunan ini dikeluarkan daripada mesin pengadun. Adunan yang dikeluarkan ini berbentuk doh (Rajah 2 (a)) dan ianya dibiarkan sejuk sehingga suhu 60°C sebelum digranulkan (Rajah 2 (b)) dengan menggunakan mesin penggranulan. Bahan suapan dalam kajian ini diklasifikasikan seperti ditunjukkan dalam Jadual 2.



Rajah 1 Proses pengadunan bahan suapan



(a) Doh adunan



(b) Granul bahan suapan

Rajah 2 Doh adunan sebelum digranulkan dan bahan suapan yang berbentuk granul setelah menjalani proses penggranulan

2.2 Ujian Reologi Bahan Suapan

Ujian reologi bahan suapan dilakukan dengan menggunakan reometer kapilari Shimadzu CFT-500 D. Dai yang mempunyai lubang 1 mm dan panjang 10 mm

dipasang di bahagian bawah tong ujian. Bahan suapan yang hendak diuji akan dimasukkan ke dalam tong ujian sebelum ianya disemperit keluar oleh ombok menerusi lubang dai tersebut.

Jadual 2 Klasifikasi bahan suapan yang digunakan

Saiz partikel serbuk, D_{50} (μm)	Beban serbuk (% isipadu)	Klasifikasi
19.606 (kasar)	64	31_64
	65	31_65
11.225 (halus)	64	16_64
	65	16_65

Bahan suapan yang hendak diuji akan dibiarkan di dalam tong ujian selama 10-15 minit bagi mencapai keseimbangan termal sebelum ditekan keluar oleh ombok. Penyusutan nilai tekanan yang merentasi dai akan direkod oleh mesin tersebut bagi mendapatkan nilai tegasan ricih pada dinding lubang dai tersebut. Kadar alir bahan suapan menerusi kapilari ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q = \frac{0.4}{t} (\text{cm}^3) \quad (1)$$

di mana t ialah masa bagi ombok bergerak daripada kedudukan 3 ke 7 mm di dalam tong ujian. Kadar ricih $\dot{\gamma}$ ditentukan oleh hubungan berikut:

$$\dot{\gamma} = \frac{32Q}{\pi D^3} 10^3 (\text{s}^{-1}) \quad (2)$$

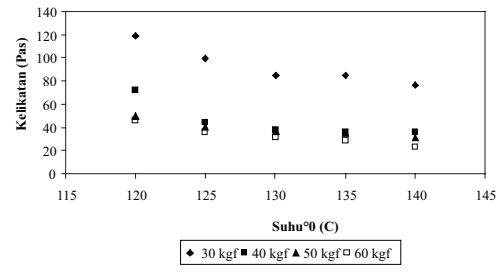
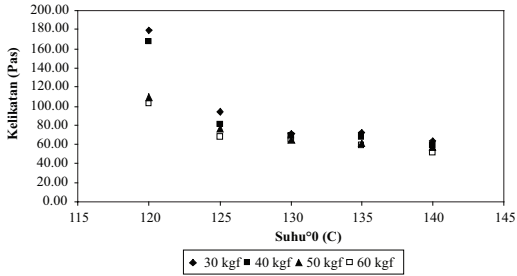
di mana D ialah diameter lubang dai, 1 mm.

3.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

3.1 Kesan Suhu Terhadap Bahan Suapan

Rajah 3 dan Rajah 4 menunjukkan kesan suhu terhadap kelikatan serta kadar ricih bahan suapan. Kedua-dua rajah tersebut secara umumnya menunjukkan penurunan kelikatan apabila suhu bahan suapan ditingkatkan, dan keadaan yang sebaliknya turut berlaku pada kadar ricih. Keadaan ini disebabkan oleh sifat pseudo plastik bahan suapan tersebut. Keadaan pseudo plastik wujud disebabkan oleh

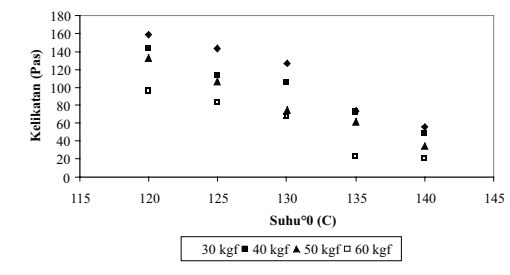
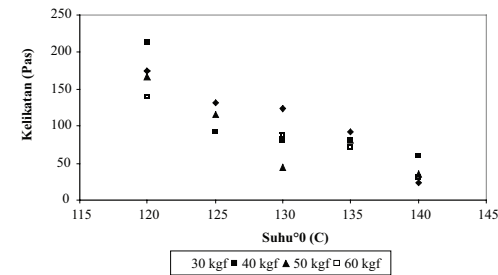
bahan pengikat yang digunakan ini ialah dari jenis polimer, di mana ikatan kovalen atom-atom polimer menjadi longgar apabila dikenakan tindakan haba.



(a) Bahan suapan 31_64

(b) Bahan suapan 31_65

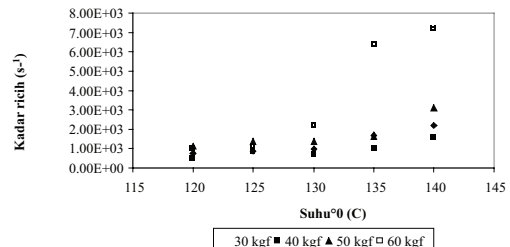
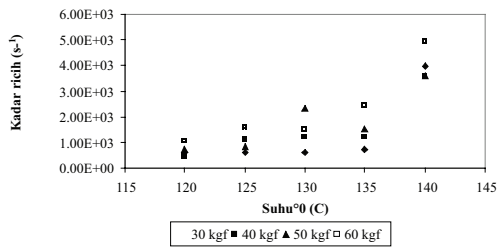
Rajah 3 Kesan suhu terhadap kelikatan dan kadar ricih bagi bahan suapan serbuk keluli kasar



(a) Bahan suapan 16_64

(b) Bahan suapan 16_65

Rajah 4 Kesan suhu terhadap kelikatan dan kadar ricih bagi bahan suapan serbuk keluli halus



Nilai beban yang ditunjukkan dalam Rajah 3 dan Rajah 4 adalah merujuk kepada nilai beban yang dikenakan pada omboh semasa ujian. Secara umumnya, Rajah 3 dan Rajah 4 menunjukkan penurunan kelikatan dan peningkatan kadar ricih pada nilai suhu tertentu apabila beban ujian ditingkatkan. Ini berlaku disebabkan oleh sifat pseudo plastik bahan yang akan mengurangkan kelikatan, dan meningkatkan kadar ricih bahan suapan apabila nilai tegasan ricihnya meningkat semasa disemperit keluar menerusi dai. Nilai tegasan ricih ini dipengaruhi oleh nilai beban yang digunakan semasa ujian seperti ditunjukkan oleh persamaan berikut [3]:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})^m \quad (3)$$

Nilai m dalam Persamaan (3) adalah bergantung kepada jenis bendalir. Bagi bendalir Newtonian, nilai m lazimnya uniti tetapi tidak bagi bahan bukan Newtonian. Ini kerana kelikatan bendalir Newtonian hanya bergantung kepada suhu dan tekanan. Kebanyakan bahan suapan MIM akan menunjukkan tingkahlaku yang lebih kompleks di mana kelikatannya turut dipengaruhi oleh kadar ricih di samping tekanan dan suhu. Umumnya, kelikatan bahan suapan MIM ini semakin berkurangan apabila kadar ricihnya meningkat. Ini disebabkan oleh keadaan yang dikenali sebagai penipisan ricih.

3.2 Sifat Pseudo Plastik Bahan Suapan

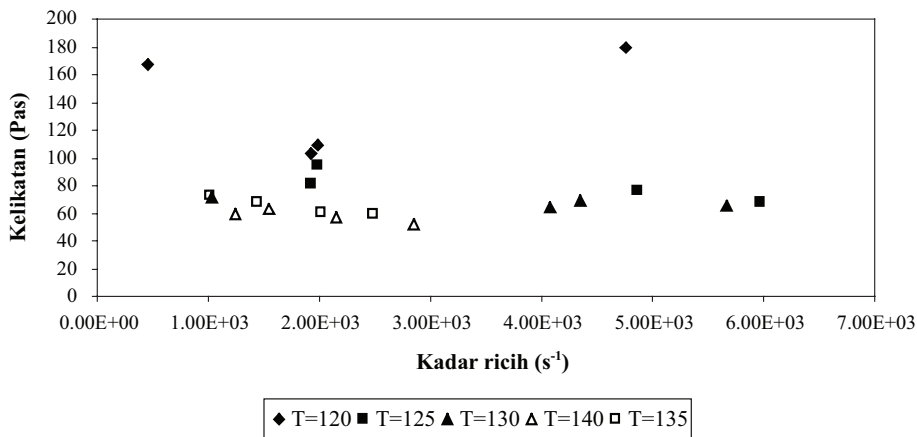
Sifat pseudo plastik bahan suapan ini akan dibincangkan lagi dengan lebih terperinci dalam bahagian ini. Persamaan umum yang menunjukkan hubungan kelikatan dengan kadar ricih bahan suapan MIM ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (4)$$

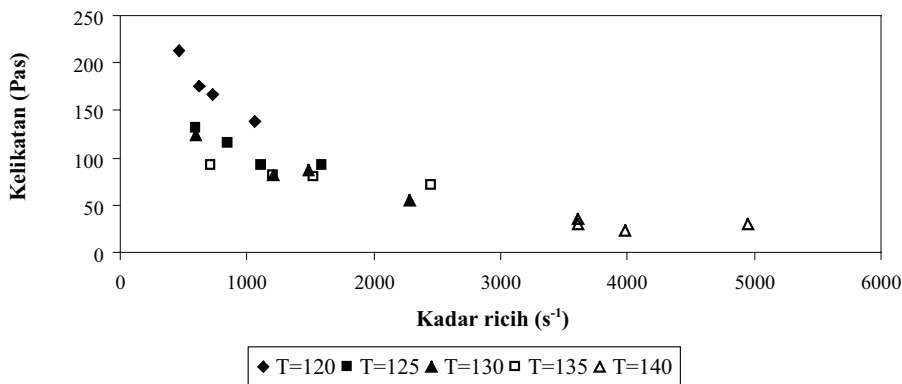
Nilai K yang ditunjukkan dalam Persamaan (4) ialah pemalar manakala nilai n pula ialah indek tingkahlaku aliran. Sekiranya nilai indek tingkahlaku aliran, n ini kurang dari uniti, ini menunjukkan bahawa bahan suapan tersebut mengalami penipisan ricih tetapi sekiranya keadaan yang sebaliknya berlaku, ini menunjukkan ianya mengalami penebalan ricih. Bahan suapan MIM hendaklah mempunyai nilai indek tingkahlaku aliran yang lebih rendah dari uniti [9, 10].

Rajah 5 menunjukkan hubungan kelikatan dengan kadar ricih bagi bahan suapan 31_64 dan 16_64 manakala Rajah 6 pula menunjukkan hubungan yang sama bagi bahan suapan 31_65 dan 16_65. Plot yang ditunjukkan oleh kedua-dua rajah menunjukkan kedua-dua bahan suapan secara umumnya mengalami penurunan kelikatan apabila kadar ricih ditingkatkan. Bagaimanapun, fenomena pemisahan bahan pengikat didapati berlaku dalam Rajah 5 (a) semasa suhu ujian

120°C pada tahap ricih menghampiri 5000 s⁻¹, ini boleh dilihat bahawa kelikatannya tiba-tiba meningkat sehingga melebihi 160 Pas. Di samping itu juga, Rajah 5 (a) tidak menunjukkan penurunan kelikatan yang jelas dengan peningkatan kadar ricihnya disebabkan oleh fenomena ini. Fenomena seperti ini selalunya berlaku apabila serbuk logam kasar digunakan dalam bahan suapan. Ianya disebabkan oleh ruangan di antara celah-celah partikel serbuk logam yang lebih besar berbanding serbuk logam halus.

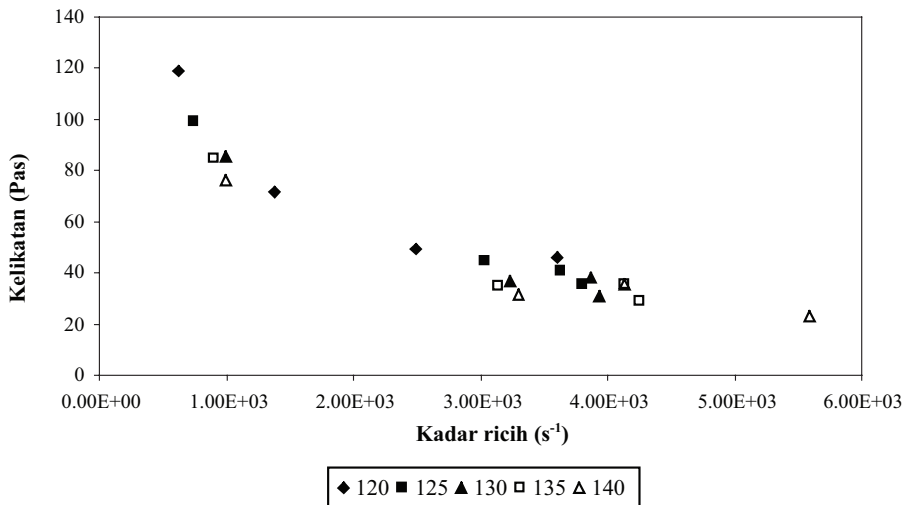


(a) Bahan suapan 31_64

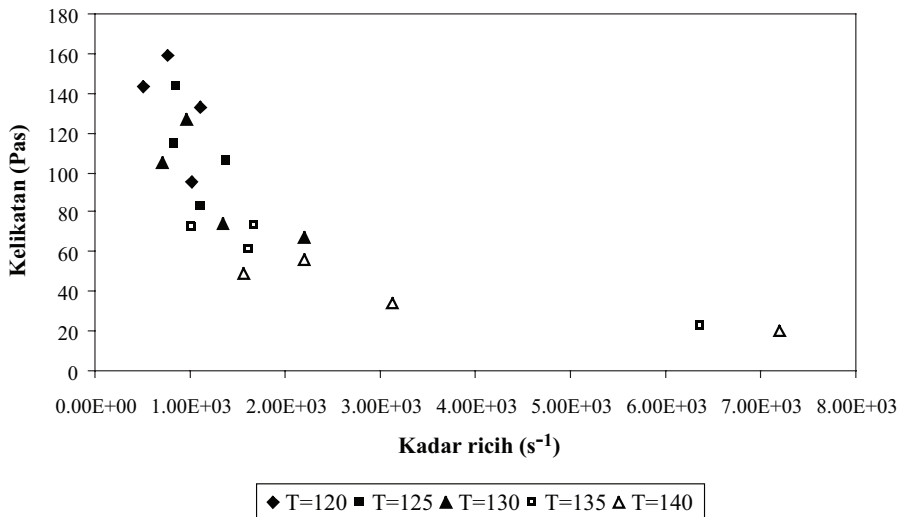


(b) Bahan suapan 16_64

Rajah 5 Kelikatan dan kadar ricih bahan suapan pada beban serbuk 64% isipadu



(a) Bahan suapan 31_65



(b) Bahan suapan 16_65

Rajah 6 Kelikatan dan kadar ricih bahan suapan pada beban serbuk 65% isipadu

Rajah 5 dan Rajah 6 menunjukkan bahawa bahan suapan yang halus adalah lebih likat [10]. Keadaan yang sama juga terjadi apabila beban serbuk ditingkatkan. Ini disebabkan oleh wujudnya geseran di antara partikel-partikel serbuk keluli

tersebut. Serbuk keluli yang halus mempunyai ruang-ruang di antara partikel yang kecil berbanding serbuk keluli kasar [3]. Ruang-ruang di antara partikel ini akan diisi oleh bahan pengikat yang akan bertindak sebagai pengangkut serbuk semasa proses penyuntikan di dalam acuan.

Peningkatan beban serbuk daripada 64% ke 65% isipadu akan mengurangkan nilai kadar ricih. Ini dapat dilihat dalam Rajah 6, di mana titik-titik hanya tertumpu di sebelah kiri plot berbanding Rajah 5, ianya kelihatan terserak ke keseluruhan graf. Apabila titik-titik dalam Rajah 6 tertumpu ke sebelah kiri, nilai kadar ricihnya adalah lebih rendah dan ini menyebabkan kelikatannya bertambah.

Rajah 6 (a) menunjukkan penyebaran titik-titik yang agak sekata berbanding Rajah 6 (b). Ini disebabkan oleh ruang-ruang di antara partikel serbuk keluli kasar lebih besar serta berupaya menyimpan lebih banyak bahan pengikat.

Sekiranya dibandingkan Rajah 5 (a) dengan Rajah 6 (a), taburan titik dalam Rajah 5 (a) lebih landai berbanding dengan titik-titik dalam Rajah 6 (a) yang menunjukkan penurunan kelikatan yang lebih jelas apabila kadar ricih meningkat. Ini sebenarnya disebabkan oleh lebihan bahan pengikat yang berada di celah-celah partikel serbuk keluli bahan suapan 31_64 (Rajah 5 (a)) telah mengurangkan geseran di antara partikel.

Kekurangan geseran di antara partikel serbuk akan mengurangkan penipisan ricih bahan suapan tersebut. Ini dapat dilihat dalam Jadual 3 di mana bahan suapan 31_64 mempunyai nilai indek tingkahlaku aliran yang menghampiri uniti. Ini menunjukkan bahawa ianya mempunyai sifat penipisan ricih yang lebih rendah berbanding bahan suapan 31_65.

Jadual 3 Indek tingkahlaku aliran

Halus				Kasar			
Bahan suapan 16_64		Bahan suapan 16_65		Bahan suapan 31_64		Bahan suapan 31_65	
Suhu	n	Suhu	n	Suhu	n	Suhu	n
120	0.49	120	0.6716	120	0.9795	120	0.4345
125	0.6113	125	0.4705	125	0.8029	125	0.4083
130	0.4351	130	0.4934	130	0.9453	130	0.3303
135	0.7951	135	0.3246	135	0.7643	135	0.3537
140	0.8555	140	0.3565	140	0.8128	140	0.3452
Purata	0.6374		0.4633		0.861		0.3744

Bagaimanapun, kedua-dua bahan suapan 16_64 dan 16_65 menunjukkan nilai indek tingkahlaku aliran yang tidak jauh berbeza dan kedua-duanya menunjukkan sifat pseudo plastik yang signifikan seperti yang dikaji oleh Khakbiz *et al.* [12]. Ini kerana nilai indek tingkahlaku aliran bahan suapan 16_64 dan 16_65 berada pada tahap pertengahan, kecuali bahan suapan 16_64 pada suhu 135°C dan 140°C yang nilainya lebih hampir dengan uniti. Bahan suapan yang mempunyai nilai indek tingkahlaku aliran yang rendah mempunyai kepekaan yang tinggi terhadap perubahan kadar ricih.

3.3 Kepekaan Bahan Suapan

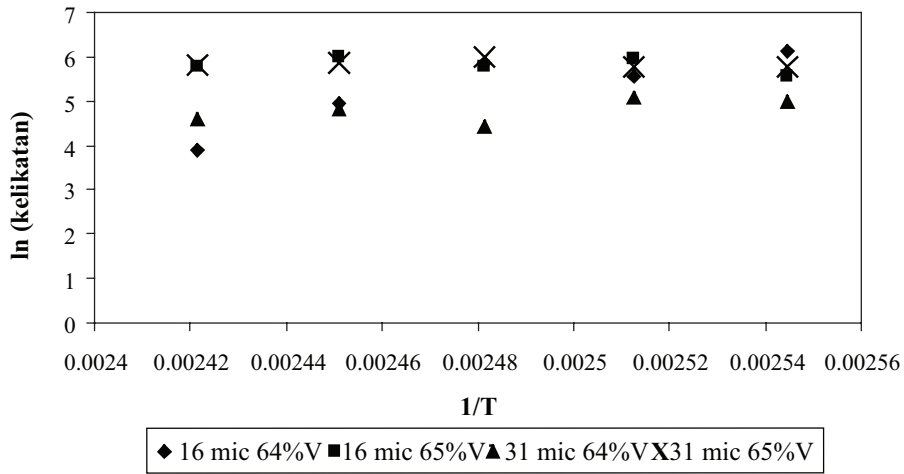
Pengaruh suhu terhadap sifat reologi bahan suapan MIM ditunjukkan dengan jelas oleh Persamaan Arrhenius [12]:

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

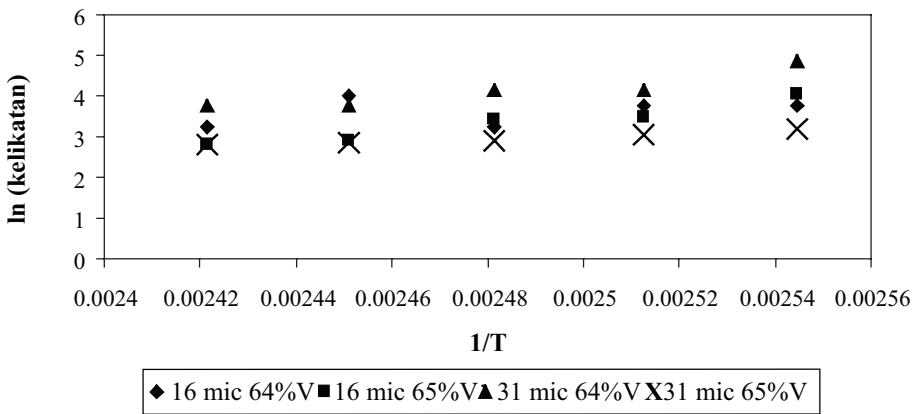
di mana R ialah pemalar gas universal, T ialah suhu, E ialah tenaga pengaktifan, η ialah kelikatan adunan pada nilai kadar ricih yang dikaji dan η_0 ialah kelikatan pada suhu rujukan. Tenaga pengaktifan, E adalah merujuk kepada kepekaan bahan suapan terhadap suhu serta tekanan penyuntikan seperti ditunjukkan oleh Persamaan (5) [5, 12].

Berpandukan kepada Persamaan (5), $\ln \eta$ melawan $1/T$ pada nilai kadar ricih 100 s⁻¹ dan 10000 s⁻¹ diplotkan seperti dalam Rajah 7. Plot yang dihasilkan adalah garis linear dan kecerunannya adalah kepekaan bahan suapan tersebut terhadap suhu dan tekanan. Nilainya yang rendah akan menghalang sebarang perubahan kelikatan mendadak dari berlaku. Perubahan kelikatan secara mendadak mengurangkan kebolehaliran bahan suapan dan menyebabkan berlakunya penumpuan tegasan, keretakan dan pembengkokkan jasad anum. Seterusnya kepekaan bahan suapan yang rendah akan membenarkan penghantaran tekanan yang lebih besar ke dalam kaviti acuan dan berupaya mengurangkan masalah kecacatan yang berkaitan dengan pengecutan jasad anum [4, 7]. Kepekaan ini adalah nilai tenaga pengaktifan, E yang ditunjukkan oleh Persamaan (5).

Tenaga pengaktifan bahan suapan yang dikaji ditunjukkan dalam Jadual 4. Nilainya didapati meningkat apabila kadar ricih ditingkatkan kecuali bagi bahan suapan 16_64. Ini disebabkan oleh berlakunya pemisahan serbuk keluli daripada matrik bahan pengikatnya [13]. Ini boleh dilihat pada nilai tenaga pengaktifannya yang rendah pada kadar ricih yang tinggi (10 000s⁻¹). Apabila beban serbuk ditingkatkan, bahan suapan mungkin menjadi kurang homogen dan menyebabkan berlakunya masalah pemisahan serbuk dengan bahan pengikat [5].



(a) Bahan suapan 100 s⁻¹



(b) Bahan suapan 10 000 s⁻¹

Rajah 7 Pergantungan sifat reologi terhadap suhu pada kadar ricih 100 dan 10 000 s⁻¹

Kajian mengenai faktor yang mempengaruhi kehomogenan bahan suapan mendapati bahawa gumpalan-gumpalan serbuk logam dan bahan pengikat semasa proses pengadunan akan menghasilkan bahan suapan yang tidak homogen [8]. Justeru, untuk mengurangkan masalah ini pengadun jenis semperit perlu digunakan [3]. Ini kerana, gumpalan-gumpalan tersebut akan dapat disebatikan dengan bahan suapan semasa proses penyemperitan dan berupaya memperbaiki kehomogenan bahan suapan tersebut di samping mengeluarkan bahan suapan yang berbentuk palet tanpa perlu melalui proses penggranulan.

Sekiranya serbuk keluli kekal dalam matrik bahan pengikatnya, nilai tenaga pengaktifannya akan meningkat seiring dengan peningkatan kadar ricihnya. Umumnya, serbuk keluli halus didapati lebih peka berbanding serbuk keluli kasar.

Jadual 4 Tenaga pengaktifan

Bahan suapan 16_64		Bahan suapan 16_65		Bahan suapan 31_64		Bahan suapan 31_65	
Kadar ricih	E (kJ/ mol)	Kadar ricih	E (kJ/ mol)	Kadar ricih	E (kJ/ mol)	Kadar ricih	E (kJ/ mol)
100	135.99	100	14.77	100	26.11	100	4.79
10,000	23.09	10,000	82.11	10,000	72.54	10,000	24.4
Purata	79.54		48.44		49.33		14.6

Untuk mengelak berlakunya perubahan kelikatan bahan suapan secara mendadak di dalam acuan semasa proses penyuntikan, bahan suapan yang mempunyai nilai tenaga pengaktifan sederhana atau lebih rendah adalah yang terbaik [14]. Bahan suapan 31_65 mempunyai purata tenaga pengaktifan yang paling rendah dan ini menunjukkan bahawa bahan suapan ini lebih fleksibel dari segi suhu suntikan berbanding bahan suapan 16_64 yang lebih peka terhadap perubahan suhu.

Apabila beban serbuk ditingkatkan, indeks kelakuan aliran akan berkurangan (Jadual 3) dan tenaga pengaktifan juga berkurangan (Jadual 4) [5, 10]. Nilai purata tenaga pengaktifan yang ditunjukkan Jadual 4 adalah menghampiri dengan yang ditunjukkan oleh literatur [4, 7] dan ini menunjukkan bahawa kepekaan bahan-bahan suapan ini masih lagi sesuai bagi tujuan penyuntikan acuan logam.

3.4 Kebolehcuan

Walaupun sifat-sifat yang lain bagi bahan suapan seperti kebolehmampatan leburan, keanjalan leburan, haba tentu dan konduktiviti termal juga mempengaruhi proses penyuntikan logam, sifat-sifat reologi yang telah dibincangkan ini juga boleh digunakan sebagai panduan semasa memilih bahan suapan yang sesuai. Bahan suapan yang mempunyai kelikatan rendah, indeks tingkahlaku aliran yang rendah dan tenaga pengaktifan yang tinggi, dianggapkan mempunyai sifat reologi yang baik dan sesuai digunakan sebagai bahan suapan MIM [7]. Bagaimanapun, terdapat percanggahan di antara ketiga-tiga parameter ini dari segi keperluannya.

Sekiranya dilihat dari segi indek tingkahlaku aliran, bahan suapan 31_65 adalah yang terbaik tetapi dari segi tenaga pengaktifan pula, bahan suapan 16_64 adalah yang terbaik. Maka, bagi mendapatkan satu keputusan yang muktamad, Persamaan Weir yang juga digunakan oleh penyelidik-penyelidik sebelum ini [5, 7, 15] telah memperkenalkan satu lagi parameter yang dikenali sebagai indek kebolehcuan yang menggabungkan ketiga-tiga parameter di atas, dan diberikan melalui Persamaan (6):

$$\alpha = \frac{109(1-n)}{\eta_o \left(\frac{E}{R} \right)} \tag{6}$$

dengan E ialah tenaga pengaktifan, R ialah pemalar gas dan α ialah indeks kebolehcuan.

Jadual 5 Indek kebolehcuan bahan suapan

Bahan suapan	16_64	16_65	31_64	31_65
Indek kebolehcuan, α	263	501	247	1941

Jadual 5 menunjukkan bahan suapan 31_65 mempunyai indek kebolehcuan yang paling tinggi dan bahan suapan 31_64 mempunyai indek kebolehcuan yang paling rendah. Dengan ini, bahan suapan 31_65 mempunyai sifat kebolehcuan yang terbaik diikuti bahan suapan 16_65, 16_64 dan 31_64.

4.0 KESIMPULAN

Sifat reologi bahan suapan MIM serbuk keluli tahan karat bersaiz halus dan kasar yang diadunkan dengan bahan pengikat PMMA, PEG dan asid sterik telah dibincangkan. Secara umumnya, bahan suapan yang dikaji ini sesuai digunakan sebagai bahan suapan MIM, bagaimanapun indek kebolehcuan menunjukkan bahawa bahan suapan 31_64 mempunyai sifat reologi yang terbaik berdasarkan kepada indek tingkahlaku aliran, n dan tenaga pengaktifan, E . Bagaimanapun, bahan suapan yang lain masih lagi boleh digunakan sebagai bahan suapan MIM. Parameter-parameter seperti kelikatan, indek tingkahlaku aliran dan tenaga pengaktifan adalah parameter yang penting dalam mengkaji kesesuaian bahan suapan MIM seperti yang telah dibincangkan tadi.

RUJUKAN

- [1] Anwar, H. M., H. A. Davies, P. F. Messer, dan B. Ellis. 1995. A Novel Binder System for Powder Injection Molding. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*. 2: 15-25.
- [2] Anwar, H. M., H. A. Davies, P. F. Messer, dan B. Ellis. 1995. Preparation of Feedstock for PIM by Using a New Binder System. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*. 2: 37-43.
- [3] German, R. M dan A. Bose. 1997. *Injection Molding of Metals and Ceramics*. New Jersey: MPIF. 25-90.
- [4] Mohd Afian Omar. 1999. Injection Moulding of 316L Stainless Steel and NiCrSiB Alloy Powder Using a PEG/PMMA Binder. PhD Thesis. University of Sheffield, UK.
- [5] Aggarwal, G., S. J. Park, dan I. Smid. 2006. Development of Niobium Powder Injection Molding: Part 1. Feedstock and Injection Molding. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 24: 253-262.
- [6] Krauss, V. A., E. N. Pires, A. N. Klein, dan M. C. Fredel. 2005. Rheological Properties of Alumina Injection Feedstocks. *Materials Research*. 8(2): 187-189.
- [7] Yimin, L., H. Baiyun, dan Q. Xuanhui. 1999. Improvement of Rheological and Shape Retention Properties of Wax-based MIM Binder by Multi-polymer Components. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 9(1): 22-29.
- [8] Muhammad Hussain Ismail, Nor Hafiez Mohd Nor, dan Junaidah Jai. 2005. Characterization of Homogeneous Feedstock for Metal Injection Molding Process. Short Term Research Report. Universiti Teknologi MARA.
- [9] Hsu, K. C. dan G. M. Lo. 1996. Effect of Binder Composition on Rheology of Iron Powder Injection Molding Feedstocks: Experimental Design. *Powder Metallurgy*. 39(4): 286-290.
- [10] Faiz Ahmad. 2005. Rheology of Metal Compositiy Mixes for Powder Injection Molding. *International Journal of Powder Metallurgy*. 41(6): 43-48.
- [11] Resende, L. M., A. N. Klein, dan A. T. Prate. 2001. Rheological Properties of Granulometric Mixtures for Powder Injection Molding. *Key Engineering Materials*. 189-191: 598-603.
- [12] Khakbiz M., A. Simchi, dan R. Bagheri. 2005. Analysis of the Rheological Behavior and Stability of 316L Stainless Steel- TiC Powder Injection Molding Feedstock. *Materials Science and Engineering A*. 407: 105-113.
- [13] Huang, B., S. Liang, dan X. Qu. 2003. The Rheology of Metal Injection Molding. *Journal of Materials Processing Technology*. 137: 132-137.
- [14] Norhamidi Muhamad, Nor Hafiez, Ahmad Kamal Ariffin, dan Shahrir Abdullah. 2002. Comparison between Simulation and Actual Molding in Determine the Defects of Green Part in Metal Injection Molding Process. Proceeding of Second World Engineering Congress. 227-229.
- [15] Karatas, C., A. Kocer, H. I. Unal, dan S. Saritas. 2004. Rheological Properties of Feedstocks Prepared with Steatite Powder and Polyethylene-based Thermoplastic Binders. *Journal of Materials Processing Technology*. 152: 77-83.