

KEBOLEHACUANAN SUNTIKAN LOGAM MIKRO SS 316L MENGGUNAKAN  
BAHAN PENGIKAT PEG DAN PMMA

MOHD HALIM IRWAN BIN HJ IBRAHIM

PTTA UTHM  
PERPUSTAKAAN TUN AMINAH

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEHI IJAZAH  
DOKTOR FALSAFAH

FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA  
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA  
BANGI

2012

## PENGHARGAAN

Syukur Alhamdulillah ke hadrat Allah S.W.T di atas kurniaannya kerana memberikan ketabahan, kesihatan, perlindungan serta fikiran yang rasional selama saya menjalankan penyelidikan ini. Ucapan jutaan terima kasih yang tidak terhingga kepada penyelia utama Prof. Dr. Norhamidi Muhamad di atas kata-kata semangat, bimbingan, nasihat, teguran serta kesediaan beliau dalam mendengar permasalahan kajian serta peribadi saya. Jasa beliau akan saya kenang sehingga ke akhir hayat dan mudah-mudahan Allah S.W.T mempermudah perjalanan kehidupan beliau. Tidak lupa juga buat penyelia bersama saya Dr. Abu Bakar Sulong di atas kepakaran beliau dalam memberikan nasihat serta pendapat yang berguna dalam menjalankan kajian ini. Layanan yang baik serta perkongsian pendapat bersama beliau amat dihargai. Juga setinggi-tinggi penghargaan dan jutaan terima kasih buat Prof. Madya Dr. Jaharah A. Ghani dan Dr. Syarif Junaidi atas tunjuk ajar dan bimbingan yang diberikan semasa kajian ini dijalankan.

Ucapan terima kasih buat sahabat-sahabat di dalam Kumpulan Penyelidikan Pembuatan Termaju, FKAB, UKM iaitu Nor Hafiez, Mohd Ruzi, Murtadhahadi, Ilman Hakimi dan Hooman yang sentiasa memberikan pendapat yang positif. Juga tidak lupa buat sahabat saya Dr. Khairur Rijal dari UTM dan Dr. Sufizar dari UTHM yang banyak memberikan idea yang kreatif dan inovatif. Jutaan terima kasih buat semua kakitangan makmal Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, FKAB, UKM dan Jabatan Kejuruteraan Mekanik, FKMP, UTHM terutamanya En. Mohd Rohaizat, En. Rusli Yusof, En. Mohd Yusof, En. Rosli Ahmad, En. Abdullah Sharif, En. Mohd Faizal Ismail, En. Yusri Marzuki, En. Jamaludin Jais, En. Mohamad Khairi, En. Tarmizi, En. Anuar, Cik Nadia dan sesiapa yang berkenaan yang banyak memberikan bantuan serta pertolongan. Juga buat PA penyelia utama saya Pn. Sabariah Meran dan Pn. Heriyantie Denan yang banyak memberikan bantuan.

Ucapan terima kasih ditujukan buat Universiti Tun Hussein Onn Malaysia selaku majikan, Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia selaku pemberi biasiswa SLAB/SLAI serta Kementerian Sains, Teknologi dan Inovasi selaku pemberian dana melalui dana *ScienceFund* 03-01-02-SF0457.

Akhir sekali, ucapan terima kasih buat isteri tersayang Norhazrin Mohamed Idris yang banyak memberikan kata-kata semangat ketika berdukacita serta buat kedua ibu bapa saya Hj. Ibrahim Samat, Hj. Jamaliah Mohamed Idris, bapa dan ibu mertua Mohamed Idris Mohamed Kasim dan Norhayati Hj Ridzwan. Juga tidak lupa buat abang-abang saya Along, Angah dan Ateh yang banyak memberikan pertolongan serta pendapat dalam kajian ini.

## ABSTRAK

Pengacuanan suntikan logam mikro atau lebih dikenali  $\mu$ MIM merupakan satu proses yang berkesinambungan daripada proses penyuntikan logam. Proses ini menggunakan serbuk logam bersaiz mikro dan mampu menghasilkan produk mikro yang kompleks pada kuantiti yang banyak serta yang memerlukan kepersisan permukaan yang tinggi dan jitu. Penggunaan saiz serbuk logam mikro akan meningkatkan nilai kelikatan bahan suapan yang mana ia merupakan cabaran utama di dalam proses  $\mu$ MIM yang akhirnya akan menyukarkan proses penyuntikan. Selain itu, ia juga akan meningkatkan peratusan kadar pengecutan dan kandungan oksigen jasad sinter. Oleh itu, kajian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter setiap proses berdasarkan kepada teknik Rekabentuk Eksperimen agar dapat menghasilkan jasad sinter yang berketumpatan tinggi dan kuat, rendah kandungan oksigen, kurang kecacatan serta kadar pengecutan yang minima. Bahan pengikat yang terdiri daripada 73vol% Polietilena Glikol (PEG), 25vol% Polimetil Metakrilate (PMMA) dan 2vol% Asid Stearik di campur dengan SS 316L bersaiz mikro bagi menghasilkan bahan suapan yang homogen dan sekata. Analisis kebolehaliran bahan suapan dikaji melalui sifat reologinya pada suhu 130-150°C iaitu suhu peleburan yang dicatatkan melalui ujian DSC. Pembebanan serbuk pada 61.5% menunjukkan pembebanan yang paling optimum kerana ia menyumbang kepada sifat pseudoplastik, kelikatan dan indeks tingkahlaku aliran yang sekata, nilai tenaga pengaktifan yang rendah serta indeks kebolehcacuan yang tinggi seperti mana yang diperlukan di dalam  $\mu$ MIM. Analisis varian (ANOVA) dilakukan di dalam setiap proses penyuntikan, penyahikatan larutan, penyahikatan terma dan pensinteran bagi mengenal pasti parameter yang paling signifikan dan sumbangannya terhadap ciri kualiti yang dikaji iaitu ketumpatan dan kekuatan lentur dengan hanya parameter kajian melebihi aras keyakinan 90% sahaja yang diambil kira. Melalui ujian ANOVA di dalam penyuntikan, 3 interaksi menunjukkan kesignifikan iaitu tekanan penyuntikan, suhu penyuntikan dan suhu acuan manakala masa penyuntikan dan masa pegangan dikekalkan sebagai parameter tunggal. Interaksi antara suhu penyuntikan dan suhu acuan merupakan penyumbang terbesar di dalam kedua-dua kaedah tersebut. Penyingkiran bahan pengikat sekunder iaitu PEG dilakukan melalui proses penyahikatan larutan pada suhu 55-65°C dengan masa rendaman antara 2-6 jam. ANOVA menunjukkan hanya 4 parameter yang signifikan di dalam proses ini iaitu masa penyahikatan, suhu penyahikatan, masa penyuntikan dan tekanan penyuntikan manakala tiada interaksi yang signifikan direkodkan di dalam proses ini. Analisis pengoptimuman menggunakan kaedah Grey-Taguchi menunjukkan masa penyahikatan adalah penyumbang terbesar diikuti oleh suhu penyahikatan iaitu sekitar 39%. Disebabkan oleh pengendalian yang amat teliti diperlukan di dalam komponen mikro, 2 proses seterusnya telah digabungkan iaitu penyahikatan terma dan pensinteran dengan menggunakan relau vakum bagi mengelakkan sebarang pengoksidaan berlaku. Bagi kedua-dua proses ini, 6 parameter dikenalpasti signifikan iaitu suhu pensinteran, masa pensinteran, kadar pensinteran, suhu penyahikatan, masa penyahikatan dan kadar penyahikatan dengan 3 interaksi diambil kira pada tatacara ortogonal  $L_{27}(3^{13})$ . Melalui kaedah pengoptimuman Grey-Taguchi ini, kekuatan dan ketumpatan jasad sinter berjaya ditingkatkan sehingga 96.79% daripada ketumpatan piknometer. Di samping itu juga, proses pengoptimuman ini juga berjaya meminimalkan kadar pengecutan jasad sinter sehingga 11.75% berbanding kajian oleh penyelidik terdahulu yang mana ia berada diantara 16-20%. Kandungan oksigen juga dapat diminimalkan sekitar 2300 ppm iaitu di dalam julat yang dibenarkan oleh piawaian ASTM E1019.

## MOULDABILITY OF MICRO METAL INJECTION SS 316L BY USING PEG AND PMMA BINDERS

### ABSTRACT

Micro Metal Injection Molding or known as  $\mu$ MIM is an extension version of metal injection molding process. This technique is capable in producing high volume of micro size products with high precision surface dimensional accuracy, which is based on the application of micro-sized metal powder. This is due to fact that micro-sized metal powder will increase the viscosity of feeding material and thus, make the injection process more difficult. Besides, it will increase the percentage of shrinkage rate and oxygen content of sintered part. As such, this work is dedicated towards optimizing the process parameters based on the Design of Experimental technique in order to produce sintered part which is high in density and strength, low oxygen content, less retarded and minimum shrinkage rate. Binders which consist of 73vol% Polyethylene Glycol (PEG), 25vol% Polymethyl Methacrylate (PMMA) and 2vol% Stearic Acid are mixed together with micro size SS316L to produce homogeneous feedstock. The feedstock flow behaviour is studied through its rheological characteristics at 130-150°C which is the recorded melting temperature from DSC test. Powder concentration at 61.5% can be regarded as optimum value due to its contribution to pseudoplastic characteristics, viscosity and flow behaviour indexes, low activation energy and high mouldability index which are highly required in  $\mu$ MIM. Consequently, the Variance Analysis method (ANOVA) is applied to the injection, solvent debinding, thermal debinding and sintering processes to determine the most significant parameters and its contribution to density and strength characteristics. Parameters exceeding 90% confidence level will be only considered for optimization. ANOVA test in injection process shows three significant interactions which are injection pressure, injection temperature and mold temperature. Meanwhile, the injection time and holding time constantly acted as single parameter. Interaction between injection temperature and mold temperature is the biggest contributor in both methods. The elimination of secondary binder, PEG is done through the solvent debinding process at 55-65°C for 2-6 hours bathing time. ANOVA test shows 4 significant parameters in this process which are debinding time, debinding temperature, injection time and injection pressure while no significant interaction recorded. Optimization analysis using Grey-Taguchi method indicates that debinding time is the biggest contributor, followed by debinding temperature at 39%. Due to highly required aspect of careful handling for micro component, the thermal debinding and sintering processes have been combined using the vacuum furnace to eliminate any possible oxidation. For both processes, six parameters have been significantly identified which are sintering temperature, sintering time, sintering rate, debinding temperature, debinding time and debinding rate with three considered interactions at orthogonal array  $L_{27}(3^{13})$ . It is shown that by Grey-Taguchi optimization, the density and strength of sintered part have been increased successfully by 96.79% from the pycnometer density. Besides, it is observed that the contraction rate of sintered body has been minimized successfully up to 11.75% as compared to previous researchers' rate of 16-20%. The oxygen content also has been minimized around 2300 ppm which is within the allowable range of standard ASTM E1019.

## KANDUNGAN

	<b>Halaman</b>
<b>PENGAKUAN</b>	ii
<b>PENGHARGAAN</b>	iii
<b>ABSTRAK</b>	iv
<b>ABSTRACT</b>	v
<b>KANDUNGAN</b>	vi
<b>SENARAI JADUAL</b>	xii
<b>SENARAI RAJAH</b>	xix
<b>SENARAI SIMBOL</b>	xxvi
<b>BAB I      PENDAHULUAN</b>	
1.1      Pengenalan	1
1.2      Permasalahan Kajian	3
1.3      Objektif Kajian	5
1.4      Skop Kajian	5
1.5      Susun Atur Tesis	6
<b>BAB II      KAJIAN LITERASI</b>	
2.1      Pengenalan	8
2.2      Bahan Suapan	10
2.2.1    Ciri, Saiz dan Bentuk Partikel Serbuk Logam	12
2.2.2    Bahan Pengikat	17
2.2.3    Penentuan Beban Serbuk	22
2.2.4    Penyediaan dan pencirian bahan Suapan	26
2.3      Sifat Reologi Bahan Suapan	31
2.4      Proses Penyuntikan & Pengacuanan	34
2.5      Proses Penyahikatan	38

2.5.1	Penyahikatan Larutan	38
2.5.2	Penyahikatan Terma	40
2.6	Proses Pensinteran	43
2.7	Kaedah Rekabentuk Eksperimen	49
2.7.1	Kaedah Grey-Taguchi	53
2.8	Kecacatan Semasa Proses MIM	55
2.9	Kesimpulan	57
<b>BAB III METODOLOGI PENYELIDIKAN</b>		
3.1	Pengenalan	59
3.2	Bahan Dan Instrumen Kajian	61
3.2.1	Serbuk Logam SS 316L	61
3.2.2	Bahan Pengikat	63
3.2.3	Penyediaan Bahan Suapan	65
3.2.4	Instrumen Kajian	67
3.3	Penentuan Kekuatan dan Ketumpatan Padatan Jasad Anum	84
3.3.1	Penentuan Kekuatan Padatan Mikro Mengikut Piawaian MPIF 15	84
3.3.2	Penentuan Ketumpatan Padatan Mikro Mengikut Piawaian MPIF 42	85
3.4	Pengoptimuman Parameter Menggunakan Kaedah Rekabentuk Eksperimen.	86
3.4.1	Pengoptimuman Menggunakan Kaedah Taguchi	87
3.5	Kesimpulan	93
<b>BAB IV KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN : PENYEDIAAN DAN ANALISIS BAHAN SUAPAN</b>		
4.1	Pengenalan	94
4.2	Pengaruh Bahan Suapan	95
4.2.1	Penyediaan Bahan Suapan	95
4.3	Hubungkait antara kelikatan dan kadar ricih serta sifat pseudoplastik bahan suapan.	98

4.3.1	Kesan pembebanan serbuk terhadap kelikatan dan kadar ricih	99
4.4	Kesan pembebanan serbuk terhadap indeks tingkahlaku aliran(n) serta hubungkait dengan penipisan ricih.	107
4.5	Pengaruh suhu terhadap kepekaan bahan suapan	110
4.5.1	Kesan pembebanan serbuk terhadap tenaga pengaktifan(E).	110
4.6	Pengaruh tenaga pengaktifan terhadap kebolehcucuan bahan suapan	119
4.6.1	Kesan pembebanan serbuk terhadap indeks kebolehcucuan( $\alpha_{stv}$ )	120
4.7	Kesimpulan	122
<b>BAB V</b>	<b>KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN : PENGOPTIMUMAN PARAMETER PROSES PENYUNTIKAN MIKRO</b>	
5.1	Pengenalan	124
5.2	Ujian Saringan : Analisis Varian (ANOVA) Bagi Ketumpatan Jasad Anum Untuk Parameter Penyuntikan.	126
5.2.1	Pengaruh Tekanan Penyuntikan (A) dan Suhu Penyuntikan (B)	127
5.2.2	Pengaruh Tekanan Penyuntikan (A) dan Suhu Acuan (C)	131
5.2.3	Pengaruh Suhu Penyuntikan (B) dan Suhu Acuan (C)	135
5.3	Ujian Saringan : Analisis Varian (ANOVA) Bagi Kekuatan Jasad Anum Untuk Parameter Penyuntikan.	140
5.3.1	Pengaruh Tekanan Penyuntikan (A) dan Suhu Penyuntikan (B)	140
5.3.2	Pengaruh Tekanan Penyuntikan (A) dan Suhu Acuan (C)	145
5.3.3	Pengaruh Suhu Penyuntikan(B) dan Suhu Acuan(C)	150
5.4	Pengoptimuman Parameter Penyuntikan Jasad Anum Menggunakan Kaedah Taguchi.	154
5.4.1	Ketumpatan	155
5.4.2	Kekuatan Lentur	164
5.5	Pengoptimuman Parameter Penyuntikan Menyeluruh Jasad	173

	Anum Menggunakan Kaedah Grey-Taguchi	
5.5.1	Analisis Perhubungan “Grey”(GRA)	173
5.5.2	Penentuan GRC dan GRG Untuk Parameter Optimum	174
5.5.3	Ujian Pengesahan Analisis Perhubungan “Grey”(GRA)	180
5.6	Perbezaan Ujian Pengesahan Taguchi dan Grey Taguchi	183
5.7	Kesimpulan	184
<b>BAB VI</b>	<b>KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN : PENGOPTIMUMAN PARAMETER PENYAHIKATAN LARUTAN</b>	
6.1	Pengenalan	186
6.2	Pengaruh Suhu Larutan Ke Atas Tempoh Penyahikatan Larutan	187
6.3	Ujian Saringan : Analisis Varian(ANOVA) Bagi Ketumpatan Jasad Perang Untuk Parameter Penyuntikan	190
6.3.1	Pengaruh Masa Penyahikatan (A) dan Suhu Penyahikatan (B)	190
6.3.2	Pengaruh Masa Penyahikatan (A) dan Masa Penyuntikan (C)	192
6.3.3	Pengaruh Suhu Penyahikatan(B) dan Masa Penyuntikan (C)	193
6.4	Ujian Saringan : Analisis Varian(ANOVA) Bagi Kekuatan Jasad Perang Untuk Parameter Penyuntikan	195
6.4.1	Pengaruh Masa Penyahikatan (A) dan Suhu Penyahikatan (B)	195
6.4.2	Pengaruh Masa Penyahikatan (A) dan Masa Penyuntikan (C)	197
6.4.3	Pengaruh Suhu Penyahikatan (B) dan Masa Penyuntikan (C)	198
6.5	Pengoptimuman Parameter Penyahikatan Larutan Jasad Perang Menggunakan Kaedah Taguchi	200
6.5.1	Ketumpatan	200
6.5.2	Kekuatan Lentur	204
6.6	Pengoptimuman Parameter Penyahikatan Larutan Menyeluruh Jasad Perang Menggunakan Kaedah Grey-Taguchi.	209
6.7	Pelarutan PEG Semasa Penyahikatan Larutan	214



6.8	Kesimpulan	217
-----	------------	-----

**BAB VII KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN :  
PENGOPTIMUMAN PARAMETER PENYAHIKATAN TERMA  
DAN PENSINTERAN**

7.1	Pengenalan	219
-----	------------	-----

7.2	Ujian Saringan : Analisis Varian(ANOVA) Bagi Ketumpatan Jasad Sinter Untuk Parameter Penyahikatan Terma/Pensinteran	220
-----	--	-----

7.2.1	Pengaruh Masa Pensinteran (A) dan Suhu Pensinteran (B)	220
-------	---	-----

7.2.2	Pengaruh Suhu Penyahikatan (D) dan Masa Penyahikatan (E)	222
-------	---	-----

7.2.3	Pengaruh Kadar Pensinteran (C) dan Kadar Penyahikatan (F)	223
-------	--	-----

7.3	Pengoptimuman Parameter Penyahikatan Terma/Pensinteran Jasad Sinter Menggunakan Kaedah Taguchi	225
-----	---	-----

7.3.1	Ketumpatan	226
-------	------------	-----

7.3.2	Kekuatan Tegangan	231
-------	-------------------	-----

7.4	Pengoptimuman Parameter Penyahikatan Terma/Pensinteran Menyeluruh Jasad Sinter Menggunakan Kaedah Grey-Taguchi.	238
-----	--	-----

7.4.1	Analisis Perhubungan “Grey”(GRA)	238
-------	----------------------------------	-----

7.4.2	Penentuan GRC dan GRG Untuk Parameter Optimum	240
-------	---	-----

7.4.3	Ujian Pengesahan Analisis Perhubungan “Grey”(GRA)	247
-------	---	-----

7.5	Kesimpulan	250
-----	------------	-----

**BAB VIII UJIAN JASAD SINTER DAN PERBANDINGAN KOMPOSISI**

8.1	Pengecutan Jasad Sinter dan Morfologi	252
-----	---------------------------------------	-----

8.2	Kandungan Karbon dan Oksigen	259
-----	------------------------------	-----

8.3	Ujian Kekerasan Vickers	261
-----	-------------------------	-----

8.4	Perbandingan Komposisi Serbuk SS 316L dan Jasad Sinter	262
-----	--	-----

8.5	Kesimpulan	264
-----	------------	-----

**BAB IX RUMUSAN DAN PENUTUP**

9.1	Pengenalan	265
-----	------------	-----

9.2	Rumusan	266
	9.2.1 Penyediaan dan Analisis Bahan Suapan	266
	9.2.2 Pengoptimuman Parameter Proses Penyuntikan Mikro	266
	9.2.3 Pengoptimuman Parameter Penyahikatan Larutan	267
	9.2.4 Pengoptimuman Parameter Penyahikatan Terma/Pensinteran	268
	9.2.5 Ujian Jasad Sinter dan Komposisi	269
9.3	Cadangan	269

<b>RUJUKAN</b>	271
----------------	-----

**LAMPIRAN**

A	Senarai Penerbitan	285
B	Data bagi Analisis Serbuk	288
C	Data bagi Ujian Reologi	291
D	Data bagi Proses Penyuntikan	301
E	Data bagi Proses Penyahikatan Larutan	319
F	Data bagi Proses Penyahikatan Terma/Pensinteran	328



PT TAJUKUTAM  
PERPUSTAKAAN TUNKU TUN AMINAH

## SENARAI JADUAL

No. Jadual		Halaman
2.1	Perbezaan antara MIM dan <i>Powder Compaction</i>	8
2.2	Penentuan indeks tingkah laku aliran	32
3.1	Ciri serbuk logam SS 316L pengatoman air	61
3.2	Komposisi kimia serbuk logam SS 316L	62
3.3	Spesifikasi bahan pengikat yang digunakan	64
3.4	Saiz serbuk logam pengatoman air	71
3.5	Parameter penyuntikan serta aras kajian untuk dioptimumkan	87
3.6	Parameter penyahikatan larutan serta aras kajian untuk dioptimumkan	88
3.7	Parameter penyahikatan larutan/pensinteran serta aras kajian untuk dioptimumkan	88
3.8	Parameter dan jumlah kebebasan bagi proses penyuntikan, penyahikatan larutan dan penyahikatan terma/pensinteran	90
3.9	Tatacara ortogon $L_9(3^4)$ bagi kajian pengoptimuman parameter penyahikatan larutan	91
3.10	Tatacara ortogon $L_9(3^4)$ bagi kajian pengoptimuman parameter penyahikatan larutan	92
4.1	Perbandingan antara $\eta_o$ , $n$ , $E$ dan $\alpha$ pada kadar ricih $1000s^{-1}$	97
4.2	Singkatan nama bagi bahan suapan	98
5.1	Parameter penyuntikan kajian	126
5.2	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan terhadap ketumpatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61%	128
5.3	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan terhadap ketumpatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61.5%	130
5.4	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan terhadap ketumpatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 62%	131
5.5	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu acuan terhadap ketumpatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61%	133

5.6	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu acuan terhadap ketumpatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61.5%	134
5.7	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu acuan terhadap ketumpatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 62%	135
5.8	ANOVA bagi pengaruh suhu penyuntikan dan suhu acuan terhadap ketumpatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61%	137
5.9	ANOVA bagi pengaruh suhu penyuntikan dan suhu acuan terhadap ketumpatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61.5%	138
5.10	ANOVA bagi pengaruh suhu penyuntikan dan suhu acuan terhadap ketumpatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 62%	140
5.11	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan terhadap kekuatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61%	142
5.12	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan terhadap kekuatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61.5%	143
5.13	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan terhadap kekuatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 62%	145
5.14	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu acuan terhadap kekuatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61%	146
5.15	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu acuan terhadap kekuatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61.5%	148
5.16	ANOVA bagi pengaruh tekanan penyuntikan dan suhu acuan terhadap kekuatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 62%	150
5.17	ANOVA bagi pengaruh suhu penyuntikan dan suhu acuan terhadap kekuatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61%	151
5.18	ANOVA bagi pengaruh suhu penyuntikan dan suhu acuan terhadap kekuatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 61.5%	152
5.19	ANOVA bagi pengaruh suhu penyuntikan dan suhu acuan terhadap kekuatan jasad anum untuk pembebanan serbuk 62%	154
5.20	Tatacara ortogon $L_{27}(3)^{13}$ yang menunjukkan ketumpatan jasad anum dan nisbah S/N dikira berdasarkan kepada yang terbesar terbaik	156
5.21	Jadual ANOVA yang menunjukkan jumlah kuasa dua, varian, nisbah varian dan peratusan sumbangan parameter yang dikaji terhadap ketumpatan jasad anum	157

5.22	Perbandingan nisbah varian, $F_n$ bagi faktor yang dikaji terhadap nilai F pada aras keyakinan 90 %	158
5.23	Jadual ANOVA setelah dikumpulkan faktor yang mempunyai peratusan sumbangan yang rendah	159
5.24	Faktor optimum tanpa mengambil kira interaksi	160
5.25	Nisbah S/N optimum bagi interaksi faktor	161
5.26	Parameter optimum setelah mengambilkira interaksi	162
5.27	Nisbah S/N optimum, selang keyakinan dan julat prestasi optimum	163
5.28	Keputusan eksperimen pengesahan yang menggunakan parameter optimum	163
5.29	Tatacara ortogon $L_{27}(3)^{13}$ yang menunjukkan kekuatan jasad anum dan nisbah S/N dtentukan berdasarkan kepada yang terbesar terbaik	165
5.30	Jadual ANOVA yang menunjukkan jumlah kuasa dua, varian, nisbah varian dan peratusan sumbangan parameter yang dikaji terhadap kekuatan jasad anum	166
5.31	Perbandingan nisbah varian, $F_n$ bagi faktor yang dikaji terhadap nilai F pada aras keyakinan 90 %	167
5.32	Jadual ANOVA setelah dikumpulkan faktor yang mempunyai peratusan sumbangan yang rendah	168
5.33	Faktor optimum tanpa mengambil kira interaksi	169
5.34	Nisbah S/N optimum bagi interaksi faktor	170
5.35	Parameter optimum setelah mengambilkira interaksi	171
5.36	Nisbah S/N optimum, selang keyakinan dan julat prestasi optimum	171
5.37	Keputusan eksperimen pengesahan yang menggunakan parameter optimum	172
5.38	Tatacara ortogonal $L_{27}(3^{13})$ bagi kualiti jasad anum; ketumpatan dan kekuatan.	174
5.39	Nilai GRC bagi ketumpatan jasad anum	175
5.40	Nilai GRC bagi kekuatan jasad anum	176

5.41	GRG bagi kualiti jasad anum	177
5.42	GRG bagi setiap aras parameter kajian	178
5.43	Parameter optimum penyuntikan dengan menggunakan kaedah Grey-Taguchi	180
5.44	Nilai GRC bagi ketumpatan jasad anum untuk eksperimen pengesahan	181
5.45	Nilai GRC bagi kekuatan jasad anum untuk eksperimen pengesahan	181
5.46	Nilai GRG dan had bawah/atas untuk eksperimen pengesahan penyuntikan	182
5.47	Nilai optimum dan perbezaan had bawah/atas bagi kaedah Taguchi dan Grey Taguchi	183
6.1	Parameter penyahikatan larutan	189
6.2	ANOVA bagi pengaruh masa penyahikatan dan suhu penyahikatan terhadap ketumpatan jasad perang	192
6.3	ANOVA bagi pengaruh masa penyahikatan dan masa penyuntikan terhadap ketumpatan jasad perang	193
6.4	ANOVA bagi pengaruh suhu penyahikatan dan masa penyuntikan terhadap ketumpatan jasad perang	195
6.5	ANOVA bagi pengaruh masa penyahikatan dan suhu penyahikatan terhadap kekuatan jasad perang	196
6.6	ANOVA bagi pengaruh masa penyahikatan dan masa penyuntikan terhadap kekuatan jasad perang	198
6.7	ANOVA bagi pengaruh suhu penyahikatan dan masa penyuntikan terhadap kekuatan jasad perang	199
6.8	Tatacara ortogon $L_9(3^4)$ yang menunjukkan ketumpatan jasad perang dan nisbah S/N dikira berdasarkan kepada "yang terbesar terbaik"	201
6.9	Jadual ANOVA yang menunjukkan jumlah kuasa dua, varian, nisbah varian dan peratusan sumbangan parameter yang dikaji terhadap ketumpatan jasad perang	202
6.10	Faktor optimum ketumpatan jasad perang	203
6.11	Nisbah S/N optimum, selang keyakinan dan julat prestasi optimum	203

6.12	Keputusan eksperimen pengesahan yang menggunakan parameter optimum	204
6.13	Tatacara ortogon $L_9(3^4)$ yang menunjukkan kekuatan lentur jasad perang dan nisbah S/N dikira berdasarkan kepada "yang terbesar terbaik"	205
6.14	Jadual ANOVA yang menunjukkan jumlah kuasa dua, varian, nisbah varian dan peratusan sumbangan parameter yang dikaji terhadap kekuatan lentur jasad perang	206
6.15	Faktor optimum kekuatan jasad perang	207
6.16	Nisbah S/N optimum, selang keyakinan dan julat prestasi optimum	208
6.17	Keputusan eksperimen pengesahan yang menggunakan parameter optimum	208
6.18	Tatacara ortogon $L_9(3^4)$ bagi kualiti jasad perang; ketumpatan dan kekuatan lentur.	210
6.19	Nilai GRC bagi ketumpatan jasad perang	210
6.20	Nilai GRC bagi kekuatan lentur jasad perang	210
6.21	GRG bagi kualiti jasad perang	211
6.22	GRG bagi setiap aras parameter kajian	212
6.23	Parameter optimum penyuntikan dengan menggunakan kaedah Grey-Taguchi	213
7.1	Parameter penyahikatan terma/pensinteran	220
7.2	ANOVA bagi pengaruh suhu pensinteran dan masa pensinteran terhadap ketumpatan jasad sinter	222
7.3	ANOVA bagi pengaruh suhu penyahikatan dan masa penyahikatan terhadap ketumpatan jasad sinter	223
7.4	ANOVA bagi pengaruh kadar pensinteran dan kadar penyahikatan terhadap ketumpatan jasad sinter	225
7.5	Tatacara ortogon $L_{27}(3)^{13}$ yang menunjukkan ketumpatan jasad sinter dan nisbah S/N dikira berdasarkan kepada yang terbesar terbaik	227
7.6	Jadual ANOVA yang menunjukkan jumlah kuasa dua, varian, nisbah varian dan peratusan sumbangan parameter yang dikaji terhadap ketumpatan jasad sinter	228

7.7	Faktor optimum tanpa mengambil kira interaksi	229
7.8	Nisbah S/N optimum bagi interaksi faktor	230
7.9	Parameter optimum setelah mengambilkira interaksi	231
7.10	Tatacara ortogon $L_{27}(3)^{13}$ yang menunjukkan kekuatan jasad sinter dan nisbah S/N dikira berdasarkan kepada yang terbesar terbaik	232
7.11	Jadual ANOVA yang menunjukkan jumlah kuasa dua, varian, nisbah varian dan peratusan sumbangan parameter yang dikaji terhadap kekuatan jasad sinter	233
7.12	Faktor optimum tanpa mengambil kira interaksi	235
7.13	Nisbah S/N optimum bagi interaksi faktor	236
7.14	Parameter optimum setelah mengambilkira interaksi	236
7.15	Tatacara ortogonal $L_{27}(3)^{13}$ bagi kualiti jasad sinter; ketumpatan dan kekuatan.	239
7.16	Nilai GRC bagi ketumpatan jasad sinter	240
7.17	Nilai GRC bagi kekuatan jasad sinter	241
7.18	GRG bagi kualiti jasad sinter	242
7.19	GRG bagi setiap aras parameter kajian	243
7.20	Jadual ANOVA yang menunjukkan jumlah kuasa dua, varian, nisbah varian dan peratusan sumbangan parameter yang dikaji terhadap kekuatan jasad sinter dengan menggunakan kaedah Grey Taguchi	244
7.21	Parameter optimum penyuntikan dengan menggunakan kaedah Grey-Taguchi	246
7.22	Nilai GRC bagi ketumpatan jasad sinter untuk eksperimen pengesahan	247
7.23	Nilai GRC bagi kekuatan jasad sinter untuk eksperimen pengesahan	247
7.24	Nilai GRG dan had bawah/atas untuk eksperimen pengesahan penyahikatan terma/pensinteran	248
7.25	Nisbah ketumpatan jasad sinter terhadap ketumpatan piknometer	249
8.1	Peratusan pengecutan terhadap panjang jasad sinter	252



8.2	Peratusan pengecutan terhadap lebar jasad sinter	253
8.3	Peratusan pengecutan terhadap tebal jasad sinter	253
8.4	Ujian kekerasan Vickers bagi jasad sinter	262
8.5	Peratus sebatian bagi serbuk dan jasad sinter SS 316L menggunakan XRF	264



## SENARAI RAJAH

No. Rajah		Halaman
2.1	Proses aliran bagi pengacuan suntikan logam mikro( $\mu$ MIM)	9
2.2	Skematik saiz serbuk yang ideal menurut German & Hens(1992)	13
2.3	Lengkuk pembebanan serbuk bagi serbuk logam-bahan pengikat	24
2.4	Tiga kemungkinan keadaan bagi pencampuran serbuk dan bahan pengikat ; a) Keadaan lompong di sebabkan kekurangan bahan pengikat, b) Beban kritikal , c) Lebihan pengikat	26
2.5	Keadaan pencampuran semasa menggunakan tork reometer	27
2.6	Contoh mesin pencampur yang sering digunakan dalam proses penghasilan bahan suapan MIM	29
2.7	Kitaran perubahan tekanan semasa proses penyuntikan	35
2.8	Kitaran lazim dalam proses pengacuanan suntikan logam	36
2.9	Mikrostruktur bahan semasa proses pensinteran	44
2.10	Model pensinteran dua sfera dengan pelekatan interpartikel	45
3.1	Carta aliran metodologi penyelidikan	60
3.2	Mikrograf imbasan elektron bagi SS 316L pengatoman air	62
3.3	Bahan pengikat yang digunakan dalam kajian	65
3.4	Proses pengadunan bahan suapan SS316L pengatoman air	66
3.5	Mesin “Ultrapycnometer 1000”	67
3.6	Analisis kalorimeter pengimbas pembezaan (DSC) bagi bahan pengikat PEG	68
3.7	Analisis kalorimeter pengimbas pembezaan (DSC) bagi bahan pengikat PMMA	68
3.8	Kaitan antara suhu peleburan, suhu pencampuran serta suhu degradasi	69
3.9	Analisis pemeteran graviti terma (TGA) bagi bahan pengikat PEG	70
3.10	Analisis pemeteran graviti terma (TGA) bagi bahan pengikat PMMA.	70

3.11	<i>Malvern Particle Analyser</i>	71
3.12	Plot kumulatif saiz partikel serbuk logam SS316L pengatoman air( $\mu\text{m}$ )	72
3.13	Pembebanan Serbuk Kritikal SS 316L	73
3.14	Mesin pengadun Sigma bilah Z	74
3.15	Mesin pembutiran/penghancur	74
3.16	Reometer rerambut Shimadzu CFT-500D	75
3.17	Mesin Penyuntikan Mikro DSM Xplore	76
3.18	Sampel bar mikro	76
3.19	MEMMERT <i>Water Bath</i> bagi proses penyahikatan larutan	77
3.20	Relau Sinter Bervakum Tinggi	78
3.21	JEOL JSM 6380LA	79
3.22	Bruker AXS D8 Advance	80
3.23	Sampel bagi ujian XRF ; (a) jasad sinter (b) serbuk SS 316L	81
3.24	BRUKER AXS S4 Pioneer	82
3.25	LECO TCH600 ONH Gas Analyzer	83
3.26	Ujian Kekerasan Vickers	84
3.27	Mesin INSTRON	85
3.28	Aplikasi prinsip Archemedis bagi mengukur ketumpatan padatan	86
4.1	Kelikatan dan kadar ricih bahan suapan yang dikaji pada suhu 130 °C	95
4.2	Korelasi kelikatan bahan suapan dengan suhu	96
4.3	Kelikatan bahan suapan pengatoman air terhadap kadar ricih pada suhu 130 °C , 140 °C dan 150 °C . (a) bahan suapan 2_61, dan (b) bahan suapan 4_61	101
4.4	Kelikatan bahan suapan pengatoman air terhadap kadar ricih pada suhu 130 °C , 140 °C dan 150 °C . (a) bahan suapan 2_61.5, dan (b) bahan suapan 4_61.5	103

4.5	Kelikatan bahan suapan pengatoman air terhadap kadar ricih pada suhu 130 °C , 140 °C dan 150 °C . (a) bahan suapan 2_62, dan (b) bahan suapan 4_62	104
4.6	Kelikatan bahan suapan pengatoman air terhadap kadar ricih pada suhu 130 °C , 140 °C dan 150 °C . (a) bahan suapan 2_62.5, dan (b) bahan suapan 4_62.5	105
4.7	Kelikatan bahan suapan pengatoman air terhadap kadar ricih pada suhu 130 °C , 140 °C dan 150 °C . (a) bahan suapan 2_63, dan (b) bahan suapan 4_63	106
4.8	Indek tingkahlaku aliran dengan pembebanan serbuk berlainan pada suhu 130°C, 140°C dan 150°C (penambahan 2ml)	108
4.9	Indek tingkahlaku aliran dengan pembebanan serbuk berlainan pada suhu 130°C, 140°C dan 150°C (penambahan 4ml)	109
4.10	Hubungkait kelikatan bahan suapan terhadap suhu pada kadar ricih 500 s <sup>-1</sup> , 1000 s <sup>-1</sup> dan 1500 s <sup>-1</sup> . (a) bahan suapan 2_61, dan (b) bahan suapan 4_61	112
4.11	Hubungkait kelikatan bahan suapan terhadap suhu pada kadar ricih 500 s <sup>-1</sup> , 1000 s <sup>-1</sup> dan 1500 s <sup>-1</sup> . (a) bahan suapan 2_61.5, dan (b) bahan suapan 4_61.5	113
4.12	Hubungkait kelikatan bahan suapan terhadap suhu pada kadar ricih 500 s <sup>-1</sup> , 1000 s <sup>-1</sup> dan 1500 s <sup>-1</sup> . (a) bahan suapan 2_62, dan (b) bahan suapan 4_62.	115
4.13	Hubungkait kelikatan bahan suapan terhadap suhu pada kadar ricih 500 s <sup>-1</sup> , 1000 s <sup>-1</sup> dan 1500 s <sup>-1</sup> . (a) bahan suapan 2_62.5, dan (b) bahan suapan 4_62.5	116
4.14	Hubungkait kelikatan bahan suapan terhadap suhu pada kadar ricih 500 s <sup>-1</sup> , 1000 s <sup>-1</sup> dan 1500 s <sup>-1</sup> . (a) bahan suapan 2_63, dan (b) bahan suapan 4_63	117
4.15	Nilai tenaga pengaktifan bahan suapan terhadap kadar ricih 500 s <sup>-1</sup> , 1000 s <sup>-1</sup> dan 1500 s <sup>-1</sup> pada pembebanan serbuk 61 %-63 % isipadu(2_61 – 2_63)	118
4.16	Nilai tenaga pengaktifan bahan suapan terhadap kadar ricih 500 s <sup>-1</sup> , 1000 s <sup>-1</sup> dan 1500 s <sup>-1</sup> pada pembebanan serbuk 61 %-63 % isipadu(4_61 – 4_63)	119
4.17	Nilai indek kebolehacuanan bahan suapan pada pembebanan serbuk 61 % - 63 % isipadu pada suhu 130 °C, 140 °C dan 150 °C (2_61 –	121

	2_63)	
4.18	Nilai indek kebolehacuanan bahan suapan pada pembebanan serbuk 61 % - 63 % isipadu pada suhu 130 °C, 140 °C dan 150 °C (4_61 – 4_63)	122
5.1	Ketumpatan jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan untuk pembebanan serbuk 61%	127
5.2	Ketumpatan jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan untuk pembebanan serbuk 61.5%	129
5.3	Ketumpatan jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan untuk pembebanan serbuk 62%	131
5.4	Ketumpatan jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 61%	132
5.5	Ketumpatan jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 61.5%	133
5.6	Ketumpatan jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 62%	135
5.7	Ketumpatan jasad anum bagi interaksi di antara suhu penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 61%	136
5.8	Ketumpatan jasad anum bagi interaksi di antara suhu penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 61.5%	138
5.9	Ketumpatan jasad anum bagi interaksi di antara suhu penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 62%	139
5.10	Kekuatan lentur jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan untuk pembebanan serbuk 61%	141
5.11	Kekuatan lentur jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan untuk pembebanan serbuk 61.5%	143
5.12	Kekuatan lentur jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu penyuntikan untuk pembebanan serbuk 62%	144
5.13	Kekuatan lentur jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 61%	146
5.14	Kekuatan lentur jasad anum bagi interaksi di antara tekanan penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 61.5%	147
5.15	Kekuatan lentur jasad anum bagi interaksi di antara tekanan	149

	penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 62%	
5.16	Kekuatan lentur jasad anum bagi interaksi di antara suhu penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 61%	151
5.17	Kekuatan lentur jasad anum bagi interaksi di antara suhu penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 61.5%	152
5.18	Kekuatan lentur jasad anum bagi interaksi di antara suhu penyuntikan dan suhu acuan untuk pembebanan serbuk 62%	153
5.19	Plot kesan utama bagi nisbah isyarat hingar (S/N)	160
5.20	Plot interaksi bagi nisbah isyarat hingar (S/N)	161
5.21	Plot kesan utama bagi nisbah isyarat hingar (S/N)	169
5.22	Plot interaksi bagi nisbah isyarat hingar (S/N)	170
5.23	Peratus sumbangan bagi parameter suntikan mikro dengan menggunakan kaedah Taguchi	173
5.24	Plot bagi $GRG, \xi(x_o, x_i)$ untuk parameter A-E	179
5.25	Plot bagi $GRG, \xi(x_o, x_i)$ untuk parameter interaksi	179
5.26	Peratus sumbangan bagi parameter suntikan mikro dengan menggunakan kaedah Grey-Taguchi.	183
6.1	Kesan suhu larutan terhadap peratusan kehilangan PEG bagi sela masa 6 jam	188
6.2	Ketumpatan jasad perang bagi interaksi di antara masa penyahikatan dan suhu penyahikatan	191
6.3	Ketumpatan jasad perang bagi interaksi di antara masa penyahikatan dan masa penyuntikan.	193
6.4	Ketumpatan jasad perang bagi interaksi di antara suhu penyahikatan dan masa penyuntikan.	194
6.5	Ketumpatan jasad perang bagi interaksi di antara masa penyahikatan dan suhu penyahikatan.	196
6.6	Ketumpatan jasad perang bagi interaksi di antara masa penyahikatan dan masa penyuntikan.	197
6.7	Ketumpatan jasad perang bagi interaksi di antara suhu penyahikatan dan masa penyuntikan.	199

6.8	Plot kesan utama bagi nisbah isyarat hingar	202
6.9	Plot kesan utama bagi nisbah isyarat hingar	207
6.10	Peratus sumbangan bagi parameter penyahikatan larutan mikro dengan menggunakan kaedah Taguchi.	209
6.11	Plot bagi GRG, $\xi(x_o, x_i)$ untuk parameter A-D	212
6.12	Peratus sumbangan bagi parameter penyahikatan larutan mikro dengan menggunakan kaedah Grey-Taguchi.	214
6.13	Mikrograf SEM pada permulaan penyahikatan larutan	215
6.14	Ilustrasi kehilangan PEG mengikut masa penyahikatan	217
7.1	Ketumpatan jasad sinter bagi interaksi di antara suhu pensinteran dan masa pensinteran.	221
7.2	Ketumpatan jasad sinter bagi interaksi di antara suhu penyahikatan dan masa penyahikatan.	223
7.3	Ketumpatan jasad sinter bagi interaksi di antara kadar pensinteran pensinteran dan kadar penyahikatan.	224
7.4	Plot kesan utama bagi nisbah isyarat hingar (S/N)	229
7.5	Plot interaksi bagi nisbah isyarat hingar (S/N)	230
7.6	Plot kesan utama bagi nisbah isyarat hingar (S/N)	234
7.7	Plot interaksi bagi nisbah isyarat hingar (S/N)	235
7.8	Peratus sumbangan bagi parameter penyahikatan terma/pensinteran mikro dengan menggunakan kaedah Taguchi.	237
7.9	Plot bagi GRG, $\xi(x_o, x_i)$ untuk parameter A-E	245
7.10	Plot bagi GRG, $\xi(x_o, x_i)$ untuk parameter interaksi	246
7.11	Peratus sumbangan bagi parameter penyahikatan terma/pensinteran mikro dengan menggunakan kaedah Grey-Taguchi	250
8.1	Jasad hijau, jasad perang, dan jasad sinter	254
8.2	Imej SEM dan struktur saiz mikro yang disinter pada suhu pensinteran 1300 °C pada masa pensinteran : (a) 60 min (b) 90 min (c) 120 min	255

- 8.3 Imej SEM dan struktur saiz mikro yang disinter pada suhu pensinteran 1275 °C pada kadar pensinteran : (a) 4 °C/min (b) 6 °C/min (c) 8 °C/min 256
- 8.4 Imej SEM dan struktur saiz mikro yang disinter pada suhu pensinteran 1300 °C pada kadar pensinteran : (a) 4 °C/min (b) 6 °C/min (c) 8 °C/min 257
- 8.5 Imej SEM dan struktur saiz mikro yang disinter pada masa pensinteran 90 min pada suhu pensinteran : (a) 1250 °C (b) 1275 °C (c) 1300 °C 258
- 8.6 Struktur saiz mikro dan porositi yang disinter pada suhu pensinteran (a) 1250 °C (b) 1275 °C 258
- 8.7 Imej SEM-EDX dan spektrum penyerakan X-Ray: (a) serbuk SS 316L (b) jasad sinter yang patah 259
- 8.8 Keputusan ujian kandungan oksigen menggunakan LECO TCH 600 ONH Gas Analyzer : (a) serbuk SS 316L (b) jasad sinter 316L 260
- 8.9 Keputusan XRD bagi serbuk tulen SS 316L dan padatan yang disinter dalam relau vakum  $10^{-5}$  torr. 263





## RUJUKAN

- Aggarwal, G. Park, S.J. & Smid, I. 2006. Development of niobium powder injection molding: Part 1. Feedstock and injection molding. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* 24: 253-262.
- Agote, I., Odriozola, A., Gutierrez, M., Santamaria, A., Quintanilla, J., Coupelle, P. & Soares, J. 2001. Rheological study of waste porcelain feedstocks for injection moulding. *Journal of European Ceramic Society* 21 : 2843-2853.
- Alfian Hamsi. 1998. Kajian sifat reologi bahan pengikat daripada polipropilena, polietilena dan minyak kelapa sawit untuk proses pengacuan suntikan logam. Tesis Sarjana Kejuruteraan, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Angermann, H.H. & Biest, O.V.D. 1994. Removal of low molecular weight components in thermal debinding of MIM compacts. *The International Journal of Powder Metallurgy* 30(4) : 445-451.
- Angermann, H.H. & Biest, O.V.D. 1995. Binder removal in powder injection molding. *Reviews in Particulate Materials* 3: 35-70.
- Anwar, M.Y., Messer, P.F., Ellis, B. & Davies, H.A. 1995a. Study of solvent partial debinding of PIM components by scanning electron microscopy. *Proc. Of Euro P.M.* 95: 613-620.
- Anwar, M.Y., Messer, P.F., Ellis, B. & Davies, H.A. 1995b. Injection moulding of 316L stainless steel powder using novel binder system. *Powder Metallurgy* 38(2) 113-119.
- Arakida, Y. & Miura, R. 1991. Powder injection molding as a metal forming process-effects of powder morphology, size and size distribution. *Key Engineering Materials* 53-55: 377-382.
- Bakan, H.I., Jumadi, Y., Messer, P.F., Davies, H.A. & Ellis, B. 1998. Study of processing parameter for MIM feedstock based on composite PEG, PMMA Binder, *Powder Metallurgy* 4 : 289-291.
- Barriere, T., Liu, B. & Gelin, J.C. 2003. Determination of the optimal process parameters in metal injection molding from experiments and numerical modelling. *Journal of Materials Processing Technology* 143-144:636-644.
- Berginc, B. Kampuš, Z. & Šuštaršič, B. 2006a. The influence of MIM and sintering process parameters on the mechanical properties of 316L SS. *Materiali In Tehnologije* 40(5) 193-198.
- Berginc, B. Kampuš, Z. & Šuštaršič, B. 2006b. The use of the Taguchi approach to determine the influence of injection-moulding parameters on the properties of

green parts. *Journal of Achievements in Materials & Manufacturing Engineering* 15(1-2) 63-70.

Biala, D. & Ludynski, Z. 1994. Water soluble binder for MIM. *Powder Metallurgy World Congress II* : 1121-1124.

Bilovol, V.V., Kowalski, L., Duszczyk, J. & Katgerman, L. 2003. Characterization of 316L powder injection moulding feedstock for purpose of numerical simulation of PIM process. *Powder Metallurgy* 46(3): 236-240.

Bloemacher, M. & Weinand, D. 1992. Injection molding of stainless steel powders with a new binder technique. *Powder Injection Molding Symposium* 99-117

Bose, A. 1994. Some critical aspects of commercial powder injection molding process. *Proc. Powder Metallurgy World Congress 2*: 1079-1086

Callister, W.D. 2007. *Materials science and engineering: An introduction*. USA : John Wiley and Sons Inc.

Cao, M.Y., O' Connors, J.W. & Chung C.I. 1992. A new water soluble solid polymer solution binder for powder injection molding. *Proc. Of Powder Injection Molding Symposium*, MPIF, Princeton, NJ, 85-98.

Cao. M.Y., Rhee, B.O & Chung, C.I. 1991. Usefulness of the viscosity measurement of feedstock in powder injection molding. *Powder Injection Molding 2* : 59-74.

Cesarone J. 2001. The power of Taguchi. IEE Solutions. *Proquest Science Journals* 33;11

Chai, L. & German, R.M. 1993. Powder injection molding using water atomized 316L stainless steel. *The International Journal of Powder Metallurgy* 31(3): 257-264.

Chitwood, A. 2001. Test pave the way to molding with coarse powder. *Injection Molding Magazine* 13.

Chuankrekul, N., Messer, P.F. & Davies, H.A. 2008. Application of polyethylene glycol and polymethyl methacrylate as a binder for powder injection moulding of hard metals. *Chiang Mai Journal of Science* 35(1): 188-195.

Chung, C.I., Rhee, B.O., Cao, M.Y. & Liu, C.X. 1989. Requirements of binder for powder injection molding. *Compend Metal Injection Molding* 2:67-72.

Coovattanachai, O., Tosangthum, N., Morakotjinda, M., Yotkaew, T., Daraphan, A., Krataitong, R., Vetayanugul, B. 7 Tongstri, R. 2007. Performance improvement of P/M 316L by addition of liquid phase forming powder. *Materials Science and Engineering A* 445-446:440-445.

Deng, J.L. 1982. Control Problems of Grey System. *System Control Letter* 5; 288-294

- Deng, J.L. 1989. Introduction to Grey System. *Journal of Grey System* 1(1): 1-24
- Dihoru, L.V., Smith, L.N. & German, R.M. 2000. Experimental analysis and neural network modelling of the rheological behaviour of powder injection molding feedstocks formed with bimodal powder mixtures. *Powder Metallurgy* 43(1) : 31-36.
- Dobrzański, L.A., Matula, G., Herranz, G., Várez, A., Levenfeld, B. & Torralba, J.M. 2006. Metal injection moulding of HS 12-1-5-5 high speed steel using a PW-HDPE based binder. *Journal of Materials Processing Technology* 175: 173-178.
- Dubois, J.H. & Frederick, W.J. 1974. *Plastic Fifth Edition*. New York : Van Nostrand Reinhold Company.
- Dvorak, P., Barriere, T. & Gelin, J.C. 2005. Jetting in metal injection moulding of 316L stainless steel. *Powder Metallurgy* 48(3) : 254-260.
- Ebenhöch, J.S. & Kruger, D.C. 1997. Control of shrinkage and distortion in PIM Parts. *Powder Injection Molding* 18 : 201-208.
- Edirisinghe, M.J. & Evans, J.R.G. 1987. Rheology of ceramic injection moulding formulations. *British Ceramics Trans. Journal* 86(1) : 18-22.
- Ehrfeld, W. & Lehr, H. 1995. Deep X-ray lithography for the production of three dimensional microstructures from metals, polymers and ceramics. *Radiat. Chem.* 45(3) 349.
- Eroglu, S. & Bakan, H.I. 2005. Solvent debinding kinetics and sintered properties of injection moulded 316L stainless steel powder. *Powder Metallurgy* 48(4): 329-332.
- Faiz Ahmad. 2005. Rheology of metal composity mixes for powder injection molding. *International Journal of Powder Metallurgy* 41(6): 43-48.
- Ferri, O.M., Ebel, T. & Bormann, R. 2009. High cycle fatigue behaviour of Ti-6Al-4V fabricated by metal injection moulding technology. *Materials Science & Engineering A* 504: 107-113.
- Fu, G., Loh, N.H., Tor, S.B., Murakoshi, Y. & Maeda, R. 2005a. Injection molding, debinding and sintering of 316L stainless steel microstructures. *Material Manufacturing Process Applied Physics A* 81, 495-500.
- Fu, G., Loh, N.H., Tor, S.B., Murakoshi, Y. & Maeda, R. 2005b. Effects of injection molding parameters on the production of microstructures by micro powder injection molding. *Materials Manufacturing Processes* 20: 977-85.

- Garino, T.J., Morales, A.M. & Boyce, B.L. 2004. The mechanical properties, dimensional tolerance and microstructural characterization of micro molded ceramic and metal components. *Microsystems Technology* 10: 506-514.
- German, R.M. 1990. *Powder Injection Moulding*. Princeton, New Jersey, USA: Metal Powder Industries Federation.
- German, R.M. 1992. Prediction of sintered density for bimodal powder mixtures. *Metallurgy Transactions A* 23 A : 1455-1465.
- German, R.M. 1996. *Sintering Theory and Practice* . USA : Wiley-Interscience Publication.
- German, R.M. 2004. Green body homogeneity effects on sintered tolerances. *Powder Metallurgy* 47(2): 157-160.
- German, R.M. & Bulger, M. 1992. The effects of bimodal particle size distribution on sintering of powder injection molded compacts. *Solid State Phenomena* 25 & 26: 55-62.
- German, R.M. & Bose, A. 1997. *Injection molding of metals and ceramics*. Princeton, New Jersey, USA: Metal Powder Industries Federation.
- German, R.M. & Cornwall, R.G. 1997. Summary report on the worldwide market and technology for injection molding of metals and ceramics. *Powder Injection Molding* 18: 3-9.
- German, R.M. & Hens, K.F. 1992. Identification of the effects of key powder characteristics on PIM. *Proc. In Powder Injection Symposium, MPIF*, Princeton, New Jersey, 1-6.
- German, R.M. & Lin, S.T.P. 1994. Constant heating rate sintering densification of bimodal alumina powder mixtures. *Journal of Material Synthesis Processing*. 2(5): 291-294.
- Glabus, M.I., Zhuang, L., Vetter, R. & Duszczuk, J. 1995. Thermal debinding of Fe<sub>3</sub>Al-X metal powder compacts. *Journal of Materials Science* 30: 6209-6217.
- Goncalves, A.C. 2001. Metallic powder injection molding using low pressure. *Journal of Materials Processing Technology* 118: 193-198.
- Gülsoy, H.Ö., Özbek, S. & Baykara, T. 2007. Microstructural and mechanical properties of injection moulded gas and water atomized 17-4PH stainless steel powder. *Powder Metallurgy* 50(2) 120-126.
- Hartwig, T., Veltl, G. Petzoldt, F., Kunze, H., Scholl, R. & Kieback, B. 1998. Powder for metal injection molding. *Journal of European Ceramic Society* 18: 1211-1216.

- Hausnerova, B. Sedlacek, T., Slezak, R. & Saha, P. 2006. Pressure dependent viscosity of powder injection molding compounds. *Rheological Acta* 45: 290-296.
- Hens, K.F & German, R.M. 1993. Advanced processing of advanced materials via powder injection molding. *Proc. Of the 1993 International Conference and Exhibition on Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Tennessee, USA, 5: 153-164.
- Hens, K.F. & Kupp, D. 1995. Advanced production methods for PIM feedstocks. *Proc Advances In Powder Metallurgy & Particulate Materials* 6: 45-54.
- Hooman Abolhasani. 2009. Development of a starch- based binder for metal injection moulding process. Master of Science, Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Hsu, K.C. & Lo, G.M. 1996. Effect of binder composition on rheology of iron powder injection molding feedstocks: experimental design. *Powder Metallurgy* 39(4): 286-290.
- Hu, S.C. & Hwang, K.S. 2000. Length change and deformation of powder injection-molded compacts during solvent debinding. *Metallurgical and Materials Transactions A* 31A: 1473-1478.
- Huang, B., Liang, S. & Qu, X. 2003. The rheology of metal injection molding. *Journal of Materials Processing Technology* 137: 132-137.
- Hwang, K.S. & Hsieh, Y.M. 1996. Comparative study of pore structure evolution during solvent and thermal debinding of powder injection molded parts, *Metallurgy Materials Transaction* 27A: 245-253.
- Hwang, K.S., Shu, G.J. & Lee, H.J. 2005. Solvent debinding behaviour of powder injection molded components prepared from powders with different particle sizes. *Metallurgical and Materials Transactions A* 36A(1): 161-167.
- Iacocca, R.G. 1994. A critical assessment of characterization tests needed to support powder injection molding component fabrication. *Reviews In Particulate Materials* (2): 269-313.
- Iriany. 2002. Kajian sifat reologi bahan suapan yang mengandungi stearin sawit untuk proses pengacuan suntikan logam. Tesis Doktor Falsafah, Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Ismail, F., Omar, M.A., Subuki, I., Abdullah, N., Ali, E.A.G.E. & Hassan, N. 2007. Characterization of the feedstock for metal injection moulding using biopolymer binder. *Proc. Of Advanced Processes and System in Manufacturing* 85-92.

- Ismail, M.H., Omar, M.A., Muhamad, N. & Jumahat, A. 2005. Study of evolution of pore structure during water leaching using PEG-PMMA binder system. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials* 4: 62-71
- Istikamah Subuki, Mohd Afian Omar, Muhamad Hussain Ismail & Zahurin Halim. 2005. Rheological properties of metal injection molding(MIM) feedstock using palm stearin and polyethylene composite binder. *Proc of Conference on Advanced Materials* 1-7.
- Istikamah Subuki, Mohd Afian Omar, Muhamad Hussain Ismail & Zahurin Halim. 2006. Solvent extraction study of injection molded component using palm stearin based binder. *Proc. In 4<sup>th</sup> National Technical Postgraduate Symposium*, 8-11.
- Japka, J.E. & German, R.M. 1991. Carbonyl iron powders for metal injection molding recent research developments. *Powder Injection Molding* 2: 15-31.
- Ji, C.H., Loh, N.H., Khor, K.A. & Tor, S.B. 2001. Sintering study of 316L stainless steel metal injection molding parts using taguchi method: final density. *Materials Science and Engineering A* 311: 74-82.
- Kalpakjian, S. 1995. *Manufacturing Engineering and Technology*. 4<sup>th</sup> Edition, USA: Prentice Hall Int.
- Kang, S.J.L. 2005. *Sintering densification, grain growth and microstructure*. UK: Elsevier Butterworth – Heinemann.
- Karatas, C. & Saritas, S. 2001. Rheological properties of MIM feedstocks produced from gas and water atomized 316L stainless steel powders. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials* 4 : 45-51.
- Karatas, C., Kocer, A., Unal, H.I. & Saritas, S. 2004. Rheological properties of feedstocks prepared with steatite powder and polyethylene-based thermoplastic binders. *Journal of Materials Processing Technology*. 152:77-83.
- Khairur Rijal Jamaludin. 2009. Kesan saiz dan bentuk partikel serbuk SS 316L terhadap parameter pengacuanan suntikan logam menggunakan rekabentuk eksperimen. Tesis Doktor Falsafah, Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Khakbiz, M., Simchi, A. & Bagheri, R. 2005a. Investigation of rheological behaviour of 316L stainless steel-3wt% TiC powder injection moulding feedstock. *Powder Metallurgy*. 48(2): 144-150.
- Khakbiz, M., Simchi, A. & Bagheri, R. 2005b. Analysis of the rheological behaviour and stability of 316L stainless steel TiC powder injection molding feedstock. *Materials Science and Engineering A*. 407: 105-113.

- Koseski, R.P., Suri, P., Earhardt, N.B., German, R.M. & Kwon, Y.S. 2005. Microstructure evolution of injection molded gas and water atomized 316L stainless steel powder during sintering. *Materials Science & Engineering A* 390: 171-177.
- Krauss, V.A., Oliveira, A.A.M., Klein, A.N., Al-Qureshi, H.A. & Fredel, M.C. 2007. A model for PEG removal from alumina injection moulded parts by solvent debinding. *Journal of Materials Processing Technology* 182: 268-273.
- Krauss, V.A., Pires, E.N., Klein, A.N. & Fredel, M.C. 2005. Rheological properties of alumina injection feedstocks. *Materials Research* 8(2): 187-89.
- Kulkarni, K.M. 2000. Metal powders and feedstocks for metal injection molding. *The International Journal of Powder Metallurgy* 36(3): 43-52.
- Lambda, Physik. 1994. *Excimer laser radiation: the key to advanced technology*. Lambda Industries 8, 1-6.
- Lee, C.C. 2008. Microwave sintering of SS 316L stainless steel: final density. *Proceeding of the 3rd Powder Metallurgy Symposium & Exhibition 2009*. ISBN 978-967-5048-61-6.
- Lee, H.R., Shu, G.J. & Hwang, K.S. 2004. Effect of particle size on the debinding of P.M. parts. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 4: 147-153.
- Li, C.H., Tsai, M.J. 2009. Multi objective optimization of laser cutting for flash memory modules with special shapes using grey relational analysis. *Optics & Laser Technology* 41; 634-642
- Li, S., Huang, B., Li, Y., Qu, X., Liu, S. & Fan, J. 2003a. A new type of binder for metal injection molding. *Journal of Materials Processing Technology* 137: 70-73.
- Li, S., Huang, B., Li, D., Li, Y., Liang, S. & Zhou, H. 2003b. Influence of sintering atmosphere on densification process of injection moulded gas atomized 316L stainless steel. *Powder Metallurgy* 46(3): 241-245.
- Li, Y., Liu, X., Luo, F. & Yue, J. 2007a. Effects of surfactant on properties of MIM feedstock. *Trans. Of Nonferrous Metals Society of China* 17: 1-8.
- Li, Y., Li, L. & Khalil, K.A. 2007b. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology* 183: 432-439.
- Lin, S.T., German, R.M., Hens, K.F. & Lee, D. 1991. Processing variables on the mechanical properties of injection molded carbonyl iron products. *Powder Injection Molding* 2: 33-41.

- Liu, S., Huang, B., Qu, X., Zhong, X., Yan, W. & Li, Y. 1999. Thermal debinding mechanism of metal injection molding compacts in vacuum. *Trans. Of Nonferrous Metals Society of China* 9(2): 1-7.
- Liu, Z.Y., Loh, N.H., Tor, S.B., Khor, K.A., Murakoshi, Y. & Maeda R., 2001 . Binder system for micro powder injection molding. *Materials Letter* 48: 31-8.
- Liu, Z.Y., Loh, N.H., Tor, S.B., Khor, K.A., Murakoshi, Y. & Maeda R., 2002 . Micro-powder injection molding. *J. Material Process Technology* 127(2): 165-8.
- Liu, Z.Y., Loh, N.H., Tor, S.B. & Khor, K.A. 2003a. Characterization of powder injection molding feedstock. *Materials Characterization* 49: 313-320.
- Liu, Z.Y., Loh, N.H., Tor, S.B., Khor, K.A., Murakoshi, Y., Maeda R. & Shimidzu, T. 2003b. Injection molding of 316L stainless steel microstructures. *Microsystem Technologies* 9(6) : 507-510.
- Liu, L., Loh, N.H., Tay, B.Y., Tor, S.B., Murakoshi, Y. & Maeda, R. 2005a. Mixing and characterization of 316L stainless steel feedstock for micro powder injection molding. *Materials Characterization* 54; 230-238.
- Liu, L., Loh, N.H., Tay, B.Y., Tor, S.B., Murakoshi, Y. & Maeda, R. 2005b. Surface roughness of microstructured component fabricated by  $\mu$ MIM. *Materials Science and Engineering A* 396; 311-319.
- Liu, L., Loh, N.H., Tay, B.Y., Tor, S.B., Murakoshi, Y. & Maeda,R. 2006. Densification and grain growth of stainless steel microsize structures fabricated by  $\mu$ MIM. *Applied Physics A Materials Science & Processing* 83:31-36.
- Liu, L., Loh, N.H., Tay, B.Y., Tor, S.B., Murakoshi, Y. & Maeda,R. 2007. Effects of thermal debinding on surface roughness in micro powder injection molding *Materials Letter* 61: 809-820.
- Merz, L., Rath, S., Ruprecht, R., Piottter, V., Hausselt, J. & Kleissl, J.R. 2002 Feedstock development for micro powder injection molding. *Microsystem Technology* 8: 129.
- Mohd Afian Omar. 1999. Injection molding of 316L stainless steel and Ni Cr Si B alloy powder using a PEG/PMMA binder. Ph.D Thesis, University of Sheffield, UK.
- Mohd Afian Omar & Istikamah Subuki. 2007. Metal injection moulding of water atomised 316L stainless steel powder using palm stearin based binder system. *Proc. Of Malaysian Symposium on Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 1-8.



- Molinari, A., Kazior, J. & Straffelini, G. 1995. Investigation of liquid-phase sintering by image analysis. *Materials Characterization* 34: 2271-2276.
- MPIF Test Method 2006. 2006. *Standard test methods for metal powders and powder metallurgy products*. Metal Powder Industries Federation. ISBN 0-9762057-3-4.
- Muhamad Hussain Ismail. 2002. Kesan pembebanan serbuk logam terhadap fenomena pemrosesan dalam pengacuan suntikan logam. Tesis Sarjana Sains, Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Murtadhahadi. 2006. Parameter penyuntikan bagi proses pengacuan suntikan logam bagi bahan suapan daripada SS 316L, PEG, PMMA dan asid stearik. Tesis Sarjana Sains, Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Mutsuddy, B.C. & Ford, R.G. 1995. *Ceramic injection molding*. London : Chapman & Hall.
- Newkirk, J.W., Zhang, H. & Thakur, S.N. 2004. Effect of part size and MIM processing on shrinkage. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 4 : 172-181.
- Norhamidi Muhamad, Muhamad Hussain Ismail, Ahmad Kamal Ariffin Mohd Ihsan & Jaafar Sahari. 2000. Effect of molding conditions in metal injection molding. *Proc. Of International Conference on Advances in Strategic Technologies* 117-126.
- Omar, M.A., Davies, P.F., Messer, P.F. & Ellis, B. 2001. The influence of PMMA content on the properties of 316L stainless steel MIM compact. *Journal of Materials Processing Technology* 113 : 477-481.
- Omar, M.A., Ibrahim, R., Sidik, M.I., Mustapha, M. & Mohamad, M. 2003. Rapid debinding of 316L stainless steel injection moulded component. *Journal of Materials Processing Technology* 140:397-400.
- Park, S.H. 1996. *Robust design and analysis for quality engineering*. UK: Chapman and Hall.
- Park, M.S., Kim, J.K., Ahn, S. & Sung, H.J. 2001. Water soluble binder of cellulose acetate butyrate/poly(ethylene glycol) blend for powder injection molding. *Journal of Materials Science* 36: 5531-5536.
- Piccirillo, N. & Lee, D. 1992. Jetting phenomenon in powder injection molding, *International Journal of Powder Metallurgy* 28(1): 13-25.
- Piotter, V., Benzler, T., Gietzelt, T., Ruprecht, R. & Hausselt, J. 2000. Micro powder injection molding. *Advanced Engineering Material* 2(10): 639-42.

- Piotter, V., Bauer, W., Benzler, T. & Emde, A. 2001. Injection molding of components for microsystem. *Microsystem Technology* 7: 99-102.
- Quinard, C., Barriere, T. & Gelin, J.C. 2008. Experiments and identification in micro powder injection moulding from stainless steel powder 5  $\mu\text{m}$  size. *International Journal Materials Form* 1: 25-32.
- Raman, R. & German, R.M. 1994. Mixing of injection molding feedstock using batch and continuous mixers. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 1-14.
- Raman, R., Slike, W. & German, R.M. 1993. Homogeneity of mixed feedstock in powder injection molding. *Proceedings of the 1993 International Conference and Exhibition on Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Tennessee, USA, 1-16.
- Ratnesh, K.D., Heaney, D.F. & German, R.M. 2008. Effect of powder characteristics and sintering conditions on density and corrosion resistance of MIM 316L stainless steel. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 101-110.
- Ravi, B.G., Chaim, R. & Gedanken, A. 1999. Sintering of bimodal alumina powder mixtures with a nanocrystalline component. *Nanostructured Materials*. 11 (7): 853-859
- Reddy, J.J., Ravi, N. & Vijayakumar, M. 2000. A simple model for viscosity of powder injection molding mixes with binder content above powder critical binder volume concentration. *Journal of the European Ceramic Society* 20: 2183-2190.
- Reddy, J.J., Vijayakumar, M., Mohan, T.R.R. & Ramakrishnan, P. 1996. Loading of solids in a liquid medium : Determination of CBVC by torque rheometry. *Journal of the European Ceramic Society* 16: 567-574.
- Resende, L.M., Klein, A.N. & Prate, A.T. 2001. Rheological properties of granulometric mixtures for powder injection molding. *Key Engineering Materials* 189-191: 598-603.
- Rhee, B.O., Cao, M.Y., Zhang, H.R., Streicher, E. & Chung, C.I. 1991. Improved wax-based binder formulations for powder injection molding. *Powder Injection Molding* 2: 43-58.
- Rhee, B.O. 1992. Processing behaviour of powder/binder mixture in powder molding binder separation and quick freezing. *Disertasi Ph.D.* New York: Rensselaer Polytechnic Institute.
- River, R.D. 1976. *Method of injection molding powder metal parts*. US Patent 4113480.

- Rota, A., Duong, T.V. & Hartwig T. 2002. Micro powder metallurgy for the replicative production of metallic microstructures. *Microsystem Technology* 8: 323-5.
- Rota, A., Duong, T.V. & Hartwig, T. 2002. Wear resistant tools for reproduction technologies produced by micro powder metallurgy. *Microsystem Technology* 7: 225-8.
- Rotenberg, K.S., Raman, R., Whitman, C.I., Snider, I.F. & German, R.M. 1992. Optimization of the mixing process for powder injection molding. *Proceeding of the Powder Injection Molding Symposium-1992*, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1-15.
- Roy, R.K. 1990. *A Primer on the Taguchi Method*. Competitive Manufacturing Series. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Roy, R.K. 2001. *Design of Experiments Using Taguchi Approach*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Ruprecht, R., Benzler, T., Hanemann, T., Muller, K., Konys, J. & Piottter, V. 1997. Various replication techniques for manufacturing three dimensional metal microstructures. *Microsystem Technology* 4: 28-31.
- Ruprecht, R., Gietzelt, T., Muller, K., Piottter, V. & Haubelt, J. 2002. Injection molding of microstructured components from plastics, metals and ceramics *Microsystem Technology* 8: 351-8.
- Samal, P., Pannell, J., Ulf, E. & Owe, M. 2010. Austenitic stainless steel with enhanced mechanical strength, *Proc. Of World PM 2010* 1:8.
- Schwartz, S. Quirnbach, P. & Kraus, M. 2002. Solvent debinding technology for a continuous 316L MIM production. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 10: 147-155.
- Setasuwon, P. Bunchavimonchet, A. & Danchaivijit, S. 2008. The effects of binder components in wax/oil systems for metal injection molding. *Journal of Materials Processing Technology* 196: 94-100.
- Shanefield, D.J. 1996. *Organic additives and ceramic processing: With applications in powder metallurgy, ink and paint*. 2<sup>nd</sup> edition. Boston: Kluwer Academic Publisher.
- Sheftel, V.O. 2000. [\*Indirect Food Additives and Polymers: Migration and Toxicology\*](#). CRC. pp. 1114–1116.
- Shengjie, Y., Li, Q.F. & Yong, M.S. 2006. Method for determination of critical powder loading for powder binder processing. *Powder Metallurgy* 49(3): 219-223.

- Shimizu, T., Murakoshi, Y., Sano, T., Maeda, r. & Sugiyama, S. 1998. Fabrications of micro parts by high aspect ratio structuring and metal injection molding using the supercritical debinding method. *Microsystem Technologies* 5: 90-92.
- Shivashankar, T.S., Kupp, D., Hens, K.F., Iacocca, R.G. & German, R.M. 1995. Injection molding high quality structures of silicon nitride by tailoring processing parameters. *Proc. Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 6: 55-70 .
- Smith, W.F., Hashemi, J. 2006. *Foundations of Materials Science and Engineering (4th ed.)*. McGraw-Hill. [ISBN 0-07-295358-6](#).
- Song, M., Park, M.S., Kim, J.K., Cho, I.B., Kim, K.H., Sungm H.J. & Ahn, S. 2005. Water soluble binder with high flexural modulus for powder injection molding. *Journal of Materials Science* 40: 1105-1109.
- Sri Yulis M. Amin. 2008. Pengoptimuman parameter penyahikatan larutan bagi proses pengacuan suntikan logam. Tesis Sarjana Sains, Jabatan Kejuruteraan Mekanik dan Bahan, Fakulti Kejuruteraan, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Supati, R., Loh, N.H., Khor, K.A. & Tor, S.B. 2000. Mixing and characterization of feedstock for powder injection molding. *Materials Letters* 46: 109-114.
- Suri, P., Antre, S.V., German, R.M. & Souza, J.P. 2003. Effect of mixing on the rheology and particle characteristics of tungsten-based powder injection molding feedstock. *Materials Science and Engineering A* 356: 337-344.
- Suri, P., Koseski, R.P. & German, R.M. 2005. Microstructural evolution of injection molded gas and water atomized 316L stainless steel powder during sintering. *Materials Science and Engineering A* 402: 341-348.
- Tay, B.Y., Liu, L., Loh, N.H., Tor, S.B., Murakoshi, Y. & Maeda, R. 2005a. Surface roughness of microstructured component fabricated by  $\mu$ MIM. *J. of Materials & Engineering A* 396 (311-319).
- Tay, B.Y., Liu, L., Loh, N.H., Tor, S.B., Murakoshi, Y. & Maeda, R. 2005b. Injection molding of 3D microstructures by  $\mu$ PIM. *Microsystems Technology* 11: 210.
- Thomas, Y. & Marple, B.R. 1998. Partially water soluble binder formulation for injection molding submicrometer zirconia. *Advanced Performance Materials*. (5): 25-41.
- Tolfree, D.W.L. 1996. X-ray lithography and its applications, *Material World* 4 (4) 189-191.
- Tsai, M.J., Li, C.H. 2009. The use of grey relational analysis to determine laser cutting parameters for QFN packages with multiple performance characteristics. *Optics & Laser Technology* 41; 914-921.

- Weil, K.S., Nyberg, E. & Simmons, K. 2006. A new binder for powder injection molding titanium and other reactive metal. *Journal of Materials Processing Technology* 176: 205-209.
- Weir, F.E., Doyle, M.E. & Norton, D.G, 1963. Mouldability of plastics based on melt rheology. *SPE Transactions* 3, 32-336.
- Westcot, E.J., Binet, C. & German, R.M. 2002. Insitu monitoring of the dimensional changes and mechanisms during solvent debinding. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 10: 137-146.
- Westcot, E.J., Binet, C. & German, R.M. 2003. In situ dimensional change, mass loss and mechanisms for solvent debinding of powder injection moulded components. *Powder Metallurgy* 46(1): 61-67.
- Wycell, D.T. 2001. The effect of powder particle size & alloying technique on distortion in MIM parts. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 4: 92-104.
- Yang, W.W & Hon, M.H. 2000. Insitu evaluation of dimensional variations during water extraction from alumina injection-moulded parts. *Journal of the European Ceramic Society* 20: 851-858.
- Yang, M.J., Atre, S.V. & German, R.M. 1996. Wax based and PEG based binder systems development for metal and ceramic powders. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 19 B: 225-232.
- Yang, W.W., Yang, K.Y. & Hon, M.H. 2002. Effects of PEG molecular weight on rheological behaviour of alumina injection molding feedstocks. *Materials Chemistry and Physics* 78: 416-424.
- Ye, H., Liu, X.Y. & Hong, H. 2008. Sintering of 17-4PH stainless steel feedstock for metal injection molding. *Materials Letters* 62 (19); 3334-3336
- Yimin, L., Xuanhui, Q. & Baiyun, H. 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.
- Yimin, L., Shaojun, L., Xuanhui, Q. & Baiyun, H. 2003. Thermal debinding processing of 316L stainless steel powder injection molding compacts. *Journal of Materials Processing Technology* 137: 65-69.
- Yimin, L. Liujun, L. & Khalil, K.A. 2007. Effect of powder loading on metal injection molding stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology* 183: 432-439.
- Yimin, L., Quan, L.X. Ling, Y.J. & Hua, L.F. 2008. Deformation behaviour and strength evolution of MIM compacts during thermal debinding. *Trans. Nonferrous Metals Soc China* 18: 278-284.

- Yoshikawa, K. & Ohmori, H. 2001. Outstanding features of powder injection moulding for micro parts manufacturing. *The Riken Review, Focused on Advances on Micro-Mechanical Fabrication Technique* (34): 13-18.
- Yu, M.C., Hsin, H.H. 2009. The use of the Taguchi method with grey relational analysis to optimize the thin film sputtering process with multiple quality characteristic in color filter manufacturing. *Computers & Industrial Engineering* 56;648-661.
- Zauner, R., Heaney, D.F., Piemme, J. & Binet, C. 2004. Variability of feedstock viscosity and its correlation with dimensional variability of green powder injection molded components. *Powder Metallurgy* 47 (1): 1-6.
- Zauner, R., Heaney, D.F., Piemme, J., Binet, C. & German, R.M. 2002. The effect of powder type and powder size on dimensional variability in PIM. *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials* 10: 191-198.
- Zhang, R., Kruszewski, J. & Lo, J. 2008. A study of the effects of sintering parameters on the microstructure and properties of PIM Ti6Al4V alloy. *Powder Injection Molding International* 2 (2): 74-78.
- Zu, Y.S. & Lin, S.T. 1997. Optimizing the mechanical properties of injection molded W-4.9% Ni-2.1% Fe in debinding. *Journal of Materials Processing Technology* 71: 337-342.

