

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

MOHD HALIM IRWAN BIN HJ IBRAHIM

TESIS YANG DIKEMUKAKAN UNTUK MEMPEROLEHI IJAZAH  
DOKTOR FALSAFAH

FAKULTI KEJURUTERAAN DAN ALAM BINA  
UNIVERSITI KEBANGSAAN MALAYSIA  
BANGI

2012

## 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 kepersisian 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 mengoptimumkan 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 kebolehcuan 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 melepasi 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 diambilkira 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</b>	<b>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</b>	<b>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
<b>BAB VII</b>	<b>KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN : PENGOPTIMUMAN PARAMETER PENYAHIKATAN TERMA DAN PENSINTERAN</b>	
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
<b>BAB VIII</b>	<b>UJIAN JASAD SINTER DAN PERBANDINGAN KOMPOSISI</b>	
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
<b>BAB IX</b>	<b>RUMUSAN DAN PENUTUP</b>	
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
	<b>LAMPIRAN</b>	
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

## 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	Peraturan pengecutan terhadap lebar jasad sinter	253
8.3	Peraturan 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 kebolehcacuanan 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

## SENARAI SIMBOL

L	panjang
W	lebar
$S_w$	taburan saiz zarah
$D_{10}$	saiz zarah pada taburan bertokok 10%
$D_{50}$	saiz zarah pada taburan bertokok 50%
$D_{90}$	saiz zarah pada taburan bertokok 90%
n	indeks pencirian aliran/tingkahlaku aliran
E	tenaga pengaktifan aliran
$\alpha_{stv}$	indeks kebolehcuan
$\Phi$	nilai pembebanan serbuk
$W_p$	pecahan berat serbuk logam
$W_b$	pecahan berat bahan pengikat
$\rho_p$	ketumpatan piknometer serbuk logam( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_b$	ketumpatan piknometer bahan pengikat
$\rho_M$	ketumpatan adunan bahan suapan
$\lambda$	konduktiviti haba ( $\text{W}/\text{m } ^\circ\text{C}$ )
a	kemeresapan haba ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$C_p$	kapasiti haba tentu ( $\text{J}/\text{g } ^\circ\text{C}$ )
$\rho$	ketumpatan jasad anum/jasad perang/jasad sinter ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$L_t$	ketebalan spesimen
t	masa
$\gamma_w$	kadar ricih pada dinding acuan
D	diameter



$\rho_s$	ketumpatan komponen yang disinter
$\rho_G$	ketumpatan komponen selepas proses penyahikatan
$\Delta L$	perubahan dimensi
$L_0$	dimensi asal
$H_0$	kehomogenan adunan awal
$t_a$	masa pengadunan(3.2)
$\alpha$	pemalar dalam persamaan 3.2
$C$	pemalar dalam persamaan 3.2
$k$	pemalar dalam persamaan 3.2
$Q$	kadar aliran bahan suapan yang melalui lubang rerambut
$\dot{\gamma}$	kadar ricih
$\eta_A$	kelikatan bahan suapan
$\eta_p$	kelikatan bahan pengikat
$\eta_0$	kelikatan pada suhu rujukan
$R$	pemalar gas
$K$	pemalar dalam persamaan 3.6
$T$	suhu
$A$	jisim kering spesimen
$B$	jisim kering spesimen setelah direndam dalam air
$C$	jisim spesimen terendam
$E_p$	jisim penyangkut semasa terendam
$\rho_w$	ketumpatan air pada suhu bilik.
$S/N$	nisbah isyarat hingar
$n$	bilangan sampel kajian
$y_{ij}$	nilai kualiti kajian

$\xi_i(k)$	Pekali Perhubungan Grey
$x_i^*(k)$	Generasi Perhubungan Grey
$\xi(x_o, x_i)$	Gred Perhubungan Grey
S	luas permukaan tentu
$V_f$	isipadu serbuk
$V_o$	isipadu asid oleik
$\tau$	tegasan ricih
m	pemalar bendalir
K	indeks konsistensi aliran(5.2)
$\alpha$	aras seerti
$\Phi_1$	darjah kebebasan parameter
$\Phi_2$	darjah kebebasan ralat
CF	faktor pembetulan
$\sum S_n$	jumlah kuasa dua faktor-faktor yang dikaji
$S_T$	jumlah nisbah S/N yang ditolak dengan faktor pembetulan
$S_e$	jumlah kuasa dua ralat
$S'_n$	jumlah kuasa dua tulen
$v_e$	nilai varian bagi ralat
$f_n$	darjah kebebasan
$v_n$	nilai varian
$F_n$	nisbah varian
$f_e$	darjah kebebasan ralat
$V_B$	peratusan bahan pengikat yang dikeluarkan
$\beta$	pemalar kebolehlarutan bahan pengikat(7.1)
Q	tenaga pengaktifan yang berkaitan dengan larutan bahan pengikat(7.1)

k	pemalar Boltzmann(7.1)
$\mu$	jangkaan keputusan pada prestasi optimum
HV	beban kenaan(kgf/mm <sup>2</sup> )

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 PENGENALAN**

Pengacuanan suntikan logam atau lebih dikenali sebagai *metal injection molding (MIM)* berkembang pesat dari masa ke semasa sebagai satu proses dalam menghasilkan bentuk geometri yang rumit dan kompleks dan berupaya menghasilkan bentuk hampir siap. Aplikasi MIM ini boleh dilihat dalam sektor perindustrian dalam menghasilkan komponen-komponen automotif, peralatan penapisan petroleum, perkakas komputer, perubatan, senjata api, peralatan pergigian serta pembedahan. Ini diakui sendiri oleh German dan Bose (1997) yang mana mereka berpendapat terdapat 5 faktor yang menyumbang kepada pemilihan MIM sebagai satu proses dalam menghasilkan komponen yang dinyatakan di atas iaitu; penjimatan kos pengeluaran, geometri yang kompleks, kemasan permukaan yang amat baik, bahan yang fleksibel serta sifat akhir yang hampir jitu. Teknologi MIM ini hampir menyerupai proses penyuntikan acuan plastik di mana serbuk logam akan diadunkan dengan lilin dan/atau termoplastik bagi menghasilkan bahan suapan yang boleh disuntik dengan menggunakan mesin penyuntikan yang sama dengan proses penyuntikan acuan plastik. Bahan suapan yang berbentuk granul ini akan dibentuk dengan menggunakan mesin penyuntikan acuan. Setelah padatan yang disuntik tadi dikeluarkan daripada acuan, bahan pengikatnya akan dinyahkan melalui proses penyahikatan. Bahan pengikat dinyahkan daripada padatan tanpa mengubah bentuk fizikalnya sebelum ianya disinter pada suhu yang menghampiri suhu lebur serbuk logam tersebut. Padatan yang telah disinter akan mempunyai kekuatan mekanikal yang setanding dengan komponen yang dihasilkan dengan proses-proses pembentukan yang lain seperti pengacuan logam dan tuangan leburan, pemesinan, padatan isostatik

sejuk dan tuangan gelinciran (German & Bose 1997). Untuk sektor industri, kebanyakan serbuk logam yang digunakan adalah daripada kaedah pengatoman gas mempunyai bentuk sfera yang mana ia lebih baik dan lebih mahal berbanding dengan serbuk logam pengatoman air.

Teknologi yang semakin berkembang ini telah membawa kepada pengenalan proses penyuntikan logam mikro atau '*micro metal injection molding*' ( $\mu$ MIM).  $\mu$ MIM adalah satu kesinambungan daripada MIM yang mana ia melibatkan 4 kaedah pemprosesan yang sama seperti MIM iaitu pencampuran, penyuntikan, penyahikatan dan pensinteran. Ia merupakan satu proses yang menjanjikan pengeluaran komponen bersaiz mikro dalam kuantiti yang banyak pada kos yang paling efektif. Teknik-teknik seperti litografi X-Ray, *electro forming* serta beberapa teknik lain dalam penghasilan komponen mikro didapati sangat terhad hanya kepada silikon, polimer serta beberapa jenis serbuk logam tulen sahaja (Ehrfeld et al. 1995; Tolfree 1996; Lambda et al. 1994). Ini membawa kepada alternatif lain dalam penghasilan komponen mikro iaitu  $\mu$ MIM itu sendiri. Walau bagaimanapun, proses  $\mu$ MIM ini masih lagi dalam peringkat kajian memandangkan ia menggunakan serbuk logam bersaiz mikro serta menitik beratkan beberapa aspek antaranya kelikatan, kekasaran permukaan (Ruprecht et al. 2002; Tay et al. 2005a; Fu et al. 2005b) serta kebolehpayaannya mengekal bentuk asal dengan baik tanpa sebarang kecacatan. Tidak seperti MIM, bahan suapan untuk  $\mu$ MIM lebih memerlukan pemerhatian yang serius dari perspektif serbuk logam yang digunakan, sistem bahan pengikat dan proses pencampuran. Dari segi perspektif serbuk, partikel yang lebih kecil adalah penting di dalam MIM kerana ia:-

- (a) menyumbang kepada perincian struktur yang kecil, nisbah bidang (*aspect ratio*) tinggi, pengekal bentuk mikrostruktur dengan baik (Ruprecht et al. 2002; Rota et al. 2002a).
- (b) memberikan kelakuan isotropik yang normal (Liu et al. 2002)
- (c) permukaan akhir yang lebih baik (Ruprecht et al. 2002; Rota et al. 2002b).

Manakala dari segi perspektif bahan pengikat, ia hendaklah mempunyai kelikatan yang rendah bagi membolehkan pengaliran sepenuhnya ke dalam acuan kaviti semasa pengacuanan suntikan. Di samping itu, sistem bahan pengikat hendaklah membenarkan tekanan bebas serta tidak berubah bentuk dalam lingkungan

submilimeter semasa penyahikatan dan pensinteran dilakukan (Merz et al. 2002). Bagi menentukan kejayaan sesebuah penyahacuan, acuan hendaklah mempunyai kekuatan yang tinggi pada suhu acuan tertentu (Ruprecht et al. 1997; Piotter et al. 2000; Piotter et al. 2001).

## 1.2 PERMASALAHAN KAJIAN

Proses  $\mu$ MIM merupakan satu proses bagi menghasilkan komponen mikro dengan geometri yang kompleks serta nisbah bidang yang tinggi. Ini adalah kerana proses pengacuanan suntikan logam konvensional tidak sesuai untuk struktur mikro dengan nisbah bidang yang tinggi (Liu et al. 2005a). Untuk kajian yang akan dijalankan ini, serbuk logam bersaiz mikro 5 mikron akan digunakan bagi menghasilkan komponen mikro. Serbuk logam bersaiz mikro menyumbang kepada kelikatan yang lebih tinggi berbanding dengan saiz serbuk logam yang besar. Peningkatan peratusan serbuk logam yang digunakan akan menyebabkan kelikatan bahan suapan meningkat yang mana ia akan menyukarkan proses pengacuanan mikro serta perlu dihindarkan di dalam proses  $\mu$ MIM (Koseski et al. 2005; Liu et al. 2006; Yimin et al. 2008). Sebaliknya peratusan bahan pengikat yang tinggi diperlukan bagi merendahkan kelikatan bahan suapan serbuk mikro. Akan tetapi, peningkatan peratusan bahan pengikat akan menyebabkan kadar pengecutan meningkat (Garino et al. 2004) dan akan merendahkan ketumpatan jasad sinter (Quinard et al. 2008). Kadar pengecutan komponen mikro yang terlalu tinggi menjadikan ia antara permasalahan kajian. Di samping itu, bahan pengikat yang berlebihan akan menyebabkan kelikatan terlalu rendah dan akhirnya masalah pemisahan serbuk-bahan pengikat pula akan berlaku (German et al. 1997; Merz et al. 2002). Manakala kekurangan bahan pengikat akan menyebabkan permukaan serbuk tidak disaluti sepenuhnya di mana akan menyukarkan pengacuanan (Chung et al. 1989). Untuk pengacuanan komponen mikro, kelikatan yang rendah amat diperlukan bagi membolehkan pengisian lengkap berlaku dengan sempurna (Liu et al. 2005a). Tetapi kelikatan yang terlalu rendah akan mengakibatkan padatan sukar untuk mengekalkan bentuknya selepas proses penyahikatan dan pensinteran (Zauner et al. 2004).

Penggunaan serbuk logam bersaiz mikro juga mengandungi kandungan oksigen yang tinggi berbanding serbuk kasar. Ini ditambah pula dengan jenis pengatoman air yang digunakan di dalam kajian ini yang lebih mudah teroksida berbanding pengatoman gas (Suri et al. 2005) di samping bentuknya yang berligamen dan tidak sekata. Ini menyukarkan lagi proses pengacuanan, penyahikatan dan pensinteran memandangkan geometri serbuk bersfera merupakan yang paling optimum di dalam MIM. Ia secara keseluruhan mempengaruhi kekuatan dan ketegaran mekanikal padatan (Zhang et al. 2008). Aspek penyahikatan dan pensinteran tanpa memperkenalkan perubahan bentuk dengan meminimakan kecacatan yang bakal dialami (Merz et al. 2002) juga merupakan permasalahan kajian. Ini adalah kerana penggunaan serbuk bersaiz mikro akan menyumbang kepada herotan jasad anum/perang serta peledingan komponen akibat daripada pengecutan isotropik. Kemampuan jasad anum/perang dalam mengekalkan bentuk sebenar mempengaruhi kejituan dimensi dan merupakan antara cabaran utama di dalam  $\mu$ MIM.

Maka untuk menyelesaikan semua pernyataan masalah di atas, satu pendekatan yang optimum harus dilaksanakan bagi mengenalpasti kesesuaian PEG dan PMMA sebagai bahan pengikat serta kemampuan sifat homogennya dalam meminimakan kadar pengecutan yang bakal dialami. Kajian ini bakal membuka lembaran baru di dalam  $\mu$ MIM di mana tiada penyelidik yang menggunakan kaedah Taguchi mahupun Grey-Taguchi di dalam mengoptimumkan parameter proses yang terlibat. Di sini kaedah Taguchi dan Grey Taguchi digunapakai bagi mengoptimumkan setiap proses yang terlibat bagi menghasilkan komponen mikro berketumpatan tinggi. Melalui kaedah rekabentuk eksperimen ini, ia dipercayai mampu meminimakan masalah herotan jasad anum, peledingan serta meminimakan kandungan oksigen jasad sinter. Pengurangan kadar pengecutan dengan aspek pengekal rupa bentuk yang baik serta kejituan dimensi merupakan antara cabaran utama di dalam  $\mu$ MIM.

### 1.3 OBJEKTIF KAJIAN

Berdasarkan kepada permasalahan kajian yang dinyatakan, maka kajian ini bertujuan untuk:-

- 1) Mengkaji peratusan pembebanan serbuk kritikal (CPVC) bagi serbuk logam keluli tahan karat SS 316L bersaiz mikro bersama bahan pengikat PEG dan PMMA dalam penghasilan komponen mikro.
- 2) Mengoptimumkan parameter penyuntikan dan penyahikatan larutan dengan menggunakan Kaedah Taguchi.
- 3) Mengoptimumkan penyahikatan terma dan pensinteran dalam satu kitaran proses relau vakum dengan menggunakan Kaedah Taguchi.
- 4) Mengkaji kesan peratusan kadar pengecutan dan ketumpatan jasad sinter hasil daripada parameter yang telah dioptimumkan pada setiap proses pengacuanan suntikan logam mikro.
- 5) Mengkaji sifat mekanikal padatan jasad hasil daripada pengoptimuman menggunakan rekabentuk eksperimen.

### 1.4 SKOP KAJIAN

Kajian ini akan melihat kepada kesesuaian penggunaan PEG dan PMMA dalam penghasilan komponen mikro dari segi sifat kehomogenannya serta kesesuaiannya semasa penyuntikan. Ia akan menggunakan serbuk SS 316L bersaiz 5 mikron dengan PEG dan PMMA bertindak sebagai bahan pengikat. Bahan pengikat ini dipilih kerana PEG dapat mengurangkan kelikatan semasa proses penyuntikan manakala menurut Supriadi (2007), PMMA pula mampu mengelakkan kelekitan antara bahan suapan. Secara signifikannya, PEG mempunyai suhu lebur yang rendah dan ia amat mudah bercampur dengan serbuk logam dan merupakan komponen yang pertama terurai dahulu semasa proses penyahikatan air (German & Bose 1997). Untuk menguatkan bahan suapan, PMMA dengan berat molekul tinggi yang berfungsi sebagai komponen sekunder ditambah untuk memberikan tegangan pada produk pada suhu yang tinggi semasa proses penyahikatan terma. Ini adalah disebabkan komponen sekunder tersebut mempunyai kelikatan dan suhu penguraian yang tinggi (Rhee 1992).



2 ciri penyahikatan ini amat penting khususnya untuk mengelakkan herotan komponen serta peledingan semasa penyahikatan.

Salah satu faktor yang perlu diberi perhatian serius adalah kebolehan jasad akhir/sinter dalam mengekalkan bentuk asal dengan baik dengan meminimalkan pengecutan yang berlaku (Liu et al. 2005b). Untuk tujuan ini, satu kaedah rekabentuk eksperimen(DOE) menggunakan Taguchi akan dilaksanakan agar parameter-parameter yang terlibat di dalam setiap proses iaitu pencampuran, penyuntikan, penyahikatan serta pensinteran dapat dioptimumkan. Kesenambungan daripada pengoptimuman ini akan mendorong kepada pengurangan kecacatan yang berlaku seperti herotan, peledingan dan seterusnya memberikan sifat mekanikal yang lebih baik dari segi ketumpatan dan sifat morfologi. Di samping itu, dengan pengoptimuman ini dijangka akan meminimalkan kadar pengecutan dan kandungan oksigen serta meningkatkan ketumpatan akhir jasad sinter. Kawalan terhadap setiap proses dalam penghasilan komponen mikro perlu dititik beratkan memandangkan  $\mu$ MIM adalah proses terkini yang masih dalam peringkat kajian secara global.

## **1.5 SUSUN ATUR TESIS**

Tesis ini terdiri daripada 9 Bab, dengan pengenalan ringkas kepada kajian yang dijalankan diterangkan dalam Bab I. Bab II membahaskan kajian kepustakaan yang berkaitan dengan tajuk penyelidikan dan proses yang berkaitan di dalam  $\mu$ MIM. Manakala Bab III pula menerangkan kaedah penyelidikan yang dijalankan bermula daripada penyediaan dan perincian bahan suapan, instrumen yang digunakan dan kaedah rekabentuk eksperimen. Selain itu, ia turut membincangkan keputusan perincian bagi suapan yang meliputi ujian pembebanan serbuk kritikal, ujian DSC dan TGA. Seterusnya Bab IV memperincikan keputusan analisis sifat reologi bahan suapan. Bab ini menjelaskan prestasi bahan suapan kajian merangkumi kesesuaiannya sebagai bahan suapan  $\mu$ MIM dengan beberapa kriteria diambil kira antaranya kelikatan, indeks tingkah laku aliran, tenaga pengaktifan dan indeks kebolehcuan. Bab V pula membincangkan pengoptimuman parameter penyuntikan mikro bermula daripada ujian saringan bagi 2 ciri kualiti kajian serta pengaruh setiap parameter terhadap proses yang dikaji. Seterusnya, pengoptimuman menggunakan Kaedah

Taguchi dan Grey Taguchi diterangkan di akhir bab. Begitu juga dengan Bab VI yang membahaskan keputusan bagi penyahikatan larutan menggunakan Rekabentuk Eksperimen. Bab VII pula memperincikan keputusan penggabungan penyahikatan terma dan pensinteran di dalam satu kitaran dan kaedah pengoptimuman yang digunakan semasa proses ini. Bab VIII menerangkan ujian jasad sinter yang merangkumi kadar pengecutan, sifat morfologi, ujian kandungan karbon dan oksigen, ujian kekerasan Vickers serta komposisi kimia jasad sinter. Kesimpulan yang dihasilkan bagi kajian ini serta cadangan bagi kajian selanjutnya ditunjukkan oleh Bab IX.

## BAB II

### KAJIAN LITERATUR

#### 2.1 PENGENALAN

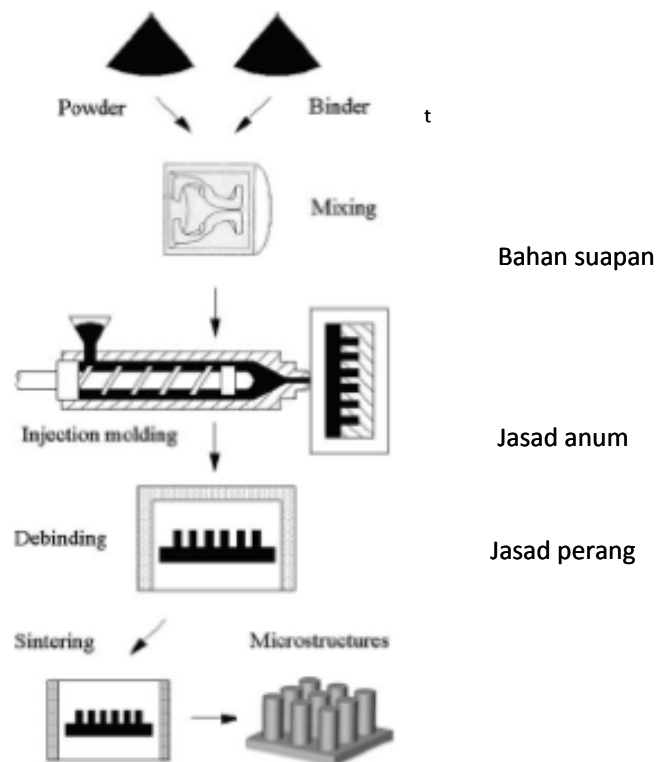
Pengacuan suntikan logam atau lebih dikenali sebagai *Metal Injection Molding*, (MIM) merupakan satu proses yang semakin menarik minat bukan sahaja para penyelidik malah sektor industri yang memerlukan penjimatan kos pada kuantiti yang banyak serta kemasan permukaan yang baik dengan sedikit sisa buangan. River (1976) merupakan individu pertama yang menggunakan bahan termoplastik sebagai bahan pengikat yang mana beliau menguraikan termoplastik daripada produk yang dihasilkan dengan cara memanaskan produk tersebut iaitu suatu kaedah yang dikenali sebagai proses penguraian haba. Penemuan demi penemuan berjaya ditemui sehingga membuatkan proses MIM ini semakin diminati berbanding kaedah konvensional metalurgi serbuk logam secara padatan (*Powder Compaction*).

Jadual 2.1 Perbezaan antara ciri komponen yang dihasilkan melalui proses MIM dan Pematatan Serbuk

<b>Pematatan Serbuk (<i>Powder Compaction</i>)</b>	<b>Pengacuan suntikan logam (<i>Metal Injection Molding</i>)</b>
Bentuk yang terhad Ketumpatan antara 73% - 90%	Bentuk terlalu rumit boleh dihasilkan Ketumpatan yang tinggi antara 93% - 97%

Sumber : German dan Bose 1997

Proses MIM menghasilkan kekasaran permukaan yang lebih baik serta ketepatan yang lebih jitu jika dibandingkan dengan kaedah metalurgi serbuk secara konvensional kerana ia menggunakan serbuk logam yang halus serta penggunaan bahan pengikat yang berfungsi sebagai 'kenderaan sementara' yang membawa serbuk logam ke dalam kaviti acuan. Ikatan mekanikal antara partikel serbuk logam amat bergantung kepada saiz partikel yang digunakan, bentuk saiz partikel serta penggunaan bahan pengikat yang mana ia akan mempengaruhi sifat kehomogenan dan seterusnya memberi kesan pada setiap proses yang terlibat di dalam MIM. Menurut Yoshikawa & Ohmori (2001), terdapat empat negara yang melakukan kajian secara mendalam terhadap bidang ini iaitu Jepun, Amerika Syarikat, Jerman dan Taiwan. Kelebihan yang ada di dalam proses MIM telah membawa kepada revolusi  $\mu$ MIM (Fu et al. 2005a, b). Rajah 2.1 menunjukkan proses aliran bagi proses  $\mu$ MIM.



Rajah 2.1 Proses aliran bagi pengacuan suntikan logam mikro ( $\mu$ MIM)

Mikro MIM lebih menjurus kepada penggunaan partikel serbuk logam yang benar-benar halus kebiasaannya di bawah 10  $\mu\text{m}$  dalam menghasilkan komponen mikro. Ia merupakan suatu proses yang berpotensi untuk menghasilkan produk mikrostruktur serta komponen mikro yang kompleks pada kuantiti yang banyak (Tay et al. 2005b; Ruprecht et al. 2002; Tomlin 2000; Rota et al. 2002). Akan tetapi, ia memerlukan beberapa kriteria tambahan terutamanya dalam pencirian bahan suapan  $\mu\text{MIM}$ . Sebagai contoh, kelikatan yang rendah amat diperlukan di dalam pengisian mikro semasa penyuntikan sebelum bahan suapan tersebut mengeras (Liu et al. 2001; Liu et al. 2002). Sebagaimana yang diketahui, kelikatan yang tinggi akan membuatkan pengacuanan lebih sukar. Mangels & Williams (1983) menyifatkan bahawa kelikatan sesuatu pengacuanan amat bergantung kepada 3 faktor utama iaitu penyerakan saiz partikel, bentuk partikel yang digunakan serta ketumpatan serbuk yang digunakan. Di atas faktor inilah yang menyebabkan kebanyakan para penyelidik secara berterusan membuat kajian kesesuaian penggunaan serbuk logam dan bahan pengikat bertujuan untuk memudahkan pengacuanan dan seterusnya meminimakan kecacatan yang kebiasaannya berlaku di dalam proses  $\mu\text{MIM}$ .

Bab II ini akan membincangkan beberapa hasil kajian literasi penulis terhadap kajian-kajian yang dilakukan oleh penyelidik terdahulu berkaitan bidang pengacuanan suntikan logam samada mikro ataupun tidak. Ini termasuklah ciri-ciri bahan suapan yang terdiri daripada serbuk logam serta bahan pengikat, sifat reologi, proses penyuntikan dan parameter suntikan, proses penyahikatan, pensinteran, kecacatan jasad anum serta jasad akhir yang dihasilkan dengan proses ini. Beberapa artikel yang relevan akan dijadikan sebagai rujukan bagi menguatkan fakta dalam menjalankan ujikaji.

## **2.2 BAHAN SUAPAN**

Di dalam  $\mu\text{MIM}$ , bahan suapan adalah medium utama bagi kejayaan penghasilan komponen mikro. Bahan suapan adalah campuran di antara serbuk logam dan bahan pengikat yang digunakan mengikut komposisi yang bersesuaian agar ia mempunyai dua ciri utama iaitu likat dan elastik. Menurut German (1990,1996) dan Bose (1994), terdapat lima faktor yang mempengaruhi sifat-sifat bahan suapan iaitu:-

- i. ciri-ciri serbuk logam
- ii. komposisi bahan pengikat
- iii. nisbah serbuk/bahan pengikat.
- iv. kaedah pencampuran.
- v. teknik pembutiran

Sesuatu bahan suapan yang disediakan hendaklah mempunyai sifat homogen supaya ia dapat memudahkan proses pengacuan dan kawalan dimensi terhadap produk akhir. Ia dikatakan homogen apabila kesemua serbuk logam diandaikan disaluti ataupun dibasahi dengan bahan pengikat (German 2004). Ketidakhomogen bahan suapan akan memberi kesan bukan sahaja terhadap data reologi malah akan mempengaruhi parameter penyuntikan serta penyahikatan komponen tersebut. Ketidakhomogenan bahan suapan ini boleh dilihat dengan mata kasar melalui kewujudan lompong dan gumpalan dalam campuran. Gumpalan berlaku akibat kegagalan bahan pengikat untuk menyelaputi permukaan serbuk logam akibat daripada beberapa faktor antaranya kekurangan bahan pengikat serta agen aktif permukaan yang berfungsi untuk menggalakkan keberaliran. Penggumpalan serbuk logam ini boleh dileraikan dengan menggunakan pengadun ricihan tinggi tetapi ianya mungkin akan menyebabkan serbuk logam tersebut teroksida (Hartwig et al. 1998).

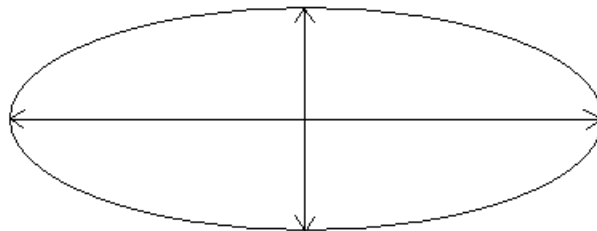
Suri et al. (2003) dalam kajiannya mendapati bahawa serbuk tungsten yang bergumpalan akan menghasilkan padatan yang berketumpatan rendah dan mempunyai kelikatan yang tinggi. Beliau mencadangkan penggunaan mesin pengadun ricihan tinggi serta mengurangkan suhu pengadunan untuk mengurangkan masalah gumpalan. Bagaimanapun suhu pengadunan yang tinggi akan menyebabkan masalah pemisahan serbuk/ bahan pengikat dan adunan yang tidak homogen yang bertindak melebarkan taburan saiz partikel dan mengurangkan kelikatan bahan suapan (Supati et al. 2000). Suhu pengadunan boleh dianggarkan melalui ujian *Differential Scanning Calorimetry (DSC)* yang mana ia dapat menentukan suhu peleburan serta suhu pengkristalan semula bahan pengikat.

### 2.2.1 Ciri, saiz dan bentuk partikel serbuk logam

Dalam memahami proses pengacuan suntikan logam, pencirian jasad hijau merupakan aspek terpenting kerana ia akan mempengaruhi sifat bahan suapan dan produk yang dihasilkan (Iacocca 1994). Serbuk logam yang halus  $D_{50} = 5.96\mu\text{m}$  yang digunakan di dalam kajian ini dijangka akan memberikan nilai pengecutan dimensi yang kecil serta memberikan sifat mekanikal yang baik. Ini adalah kerana serbuk halus mempunyai luas permukaan bersentuhan yang lebih kecil di antara partikel serbuk. Pemadatan saiz partikel melalui kadar pembebanan yang tinggi ini akan menghasilkan geseran antara partikel yang lebih tinggi semasa penyuntikan dan persinteran dan ini akan mengurangkan kemungkinan jasad anum tersebut membengkok atau berubah bentuk semasa proses penyahikatan serta proses pensinteran. Ini diakui sendiri oleh Iacocca (1994), German (1990) yang mana ketumpatan padatan yang tinggi adalah merupakan satu perkara yang perlu dititikberatkan kerana ia akan menguatkan struktur akhir serta mengurangkan peratusan pengecutan (Glabus et al. 1995; Japka & German 1991; Rhee et al. 1991). Serbuk halus mempunyai sifat kebolehsinteran yang lebih baik berbanding dengan yang kasar tetapi ia memerlukan masa penyahikatan serta pensinteran yang lebih lama serta lebih mahal. Di samping itu, serbuk halus juga menyumbang kepada kelikatan yang lebih tinggi berbanding dengan penggunaan serbuk kasar yang mana di dalam pengacuan suntikan logam, kelikatan yang rendah amat diperlukan bagi memudahkan pengaliran ke dalam acuan mikro (Liu et al. 2001) dan tenaga pengaktifan yang rendah (Cao et al. 1991). Oleh itu, penggunaan serbuk logam halus ini akan menyukarkan proses penyuntikan akibat faktor-faktor di atas. Khairur Rijal (2009) telah menggunakan serbuk bimodal iaitu campuran serbuk kasar dan halus yang mana ia lebih mudah untuk disuntik serta dapat meningkatkan ketumpatan jasad anum. Hal ini telah dibuktikan oleh German dan Bulger (1992) ; German (1992); German dan Lin (1994) dan Resende et al. (2001). Menurut German dan Lin (1994), ketumpatan jasad anum ini bertambah disebabkan oleh pemadatan serbuk logam telah ditingkatkan dengan kehadiran serbuk logam yang lebih halus bagi mengisi ruang-ruang kosong di antara partikel serbuk logam yang kasar disamping ianya dapat mengurangkan pengecutan jasad anum apabila ianya dinyahikatan dan disinter. Selain daripada itu, kajian oleh Ravi et al. (1999) mendapati ketumpatan jasad anum yang disediakan dengan menggunakan serbuk alumina dwiragaman telah

meningkat sebanyak tujuh hingga sebelas peratus berbanding serbuk logam tunggal kasar.

German & Hens (1992) telah mengenalpasti bahawa bentuk serbuk logam yang sesuai digunakan di dalam MIM adalah berbentuk “bola ragbi” atau bentuk “kentang” seperti yang dapat dilihat pada Rajah 2.2. Dengan nisbah L/W di antara 1.2 hingga 1.5, geometri ini dipercayai dapat menghasilkan kesan saling kunci atau ‘*interlocking*’ yang amat baik berbanding dengan saiz zarah yang berbentuk sfera. Fenomena ini akan memberikan kekuatan jasad hijau yang tinggi serta memberikan nilai ketumpatan padatan yang lebih tinggi berbanding dengan serbuk yang berbentuk sfera (German & Bose 1997).



Rajah 2.2 Skematik saiz serbuk yang ideal.

Sumber : German & Hens 1992

Terdapat pelbagai saiz zarah serbuk yang digunakan dalam proses penyuntikan tetapi pada umumnya bersaiz di bawah  $25\mu\text{m}$  (Kulkarni 2000). Serbuk yang paling sesuai untuk proses penyuntikan adalah yang mempunyai saiz zarah median antara 2 hingga  $8\mu\text{m}$  (German & Hens 1992; Shivashankar et al. 1995).

Menurut German & Bose (1997), kebolehpayaan sesuatu serbuk logam untuk disuntik adalah bergantung kepada nilai taburan lengkung atau taburan saiz zarah,  $S_w$ . Serbuk yang paling mudah disuntik mempunyai nilai parameter taburan saiz zarah ( $S_w$ ) lebih kecil daripada 2 atau lebih besar daripada 7 (sangat lebar ataupun sangat sempit) (German dan Bose 1997, Yang et al. 1996 dan Iacocca 1994). Taburan saiz zarah yang sempit sesuai untuk pembasahan bahan pengikat. Manakala serbuk yang agak sukar disuntik mempunyai nilai  $S_w$  antara 4 dan 5. Ini adalah kerana taburan saiz



partikel tersebut adalah sempit jika dibandingkan dengan serbuk yang lebih kasar. Serbuk yang mempunyai taburan saiz zarah yang lebar boleh meningkatkan ketumpatan padatan kerana zarah-zarah yang halus akan mengisi liang-liang di antara zarah-zarah yang besar (Mutsuddy & Ford 1995; Shanefield 1996).  $S_w$  atau lebih dikenali sebagai lengkung taburan kumulatif log-normal dianalisa menggunakan persamaan berikut:-

$$S_w = \frac{2.56}{\log_{10} \left( \frac{D_{90}}{D_{10}} \right)} \quad (2.1)$$

dengan  $D_{90}$  dan  $D_{10}$  adalah saiz zarah pada taburan bertokok 90% dan 10%.

Jika diperhatikan kepada nilai  $S$  iaitu luas permukaan tentu, ia merujuk kepada keupayaan sesuatu bahan dalam mengisi ruang-ruang antara partikel semasa proses penyuntikan, penyahikatan dan pensinteran (Lee et al. 2004). Luas permukaan tentu yang lebih besar akan memberikan penumpatan padatan yang lebih baik dan seterusnya akan menyebabkan kadar pengecutan adalah lebih besar (German 1996; Zauner et al. 2002). Lee et al. (2004) melalui artikelnya mengesahkan bahawa penggunaan serbuk kasar yang mana nilai luas permukaan tentu,  $S$  yang rendah hanya memberikan kesan yang amat kecil ke atas proses penyahikatan. Justeru, penggunaan serbuk yang lebih halus akan mengisi keliangan yang ada dengan lebih baik jika dibandingkan dengan serbuk kasar. Seterusnya, ketumpatan tap akan menjadi semakin rendah apabila keliangan-keliangan yang ada diisi dengan baik oleh serbuk halus. Sentuhan antara partikel-partikel serbuk logam akan menyebabkan daya geseran meningkat dan ini berlaku hanya apabila luas permukaan tentu,  $S$  bertambah. Ini adalah antara permasalahan yang timbul apabila serbuk yang lebih halus digunakan di dalam pengacuanan suntikan mikro.

Secara amnya, luas permukaan tentu ( $S$ ) dinyatakan dalam ( $m^2/g$ ) adalah seperti berikut (German dan Bose 1997):-

$$S = \frac{6}{\rho D} \quad (2.2)$$

dengan  $D$  adalah saiz partikel dan  $\rho$  adalah ketumpatan teori bahan tersebut.

Penggunaan serbuk logam yang halus di dalam  $\mu$ MIM menjanjikan ketumpatan sinter yang tinggi serta kekasaran permukaan yang lebih baik. Ini adalah kerana liang serta rongga yang ada memudahkan pengaliran serbuk logam memenuhi ruang yang kosong. Pemisahan bahan pengikat juga boleh dikurangkan apabila saiz serbuk semakin halus. Akan tetapi sektor industri yang menggunakan serbuk bersaiz kasar di dalam penghasilan komponen mengalami masalah dalam mendapatkan ketumpatan sinter yang tinggi (Newkirk et al. 2004). Oleh sebab itu, kebanyakan kajian peyelidikan yang dijalankan lebih terarah dalam menggunakan serbuk yang halus berbanding yang kasar di dalam MIM dan  $\mu$ MIM.

Kajian yang dilakukan menggunakan serbuk kasar oleh Chitwood (2001) mendapati bahawa partikel saiz yang lebih kecil memberikan ketumpatan yang lebih tinggi berbanding serbuk kasar. Perkara yang sama turut disahkan melalui ujikaji yang dijalankan oleh Arakida dan Miura (1991) yang menggunakan serbuk halus 20  $\mu$ m dan 150 $\mu$ m melalui kaedah pengatoman air dan gas yang mana ia turut meningkatkan sifat mekanikal bahan tersinter.

Dihoru et al. (2000) mendapati bahawa indeks ketidakstabilan bahan suapan akan meningkat melalui penurunan saiz partikel. Masalah ini telah menjadi penghalang kepada penggunaan serbuk logam bersaiz halus dalam kejayaan sesuatu pengacuan suntikan logam mikro. Menurut Hartwig et al. (1998), serbuk logam halus mempunyai permasalahan iaitu tiada kaedah pengeluaran untuk serbuk sub mikrometer dan pengendalian serbuk akan menjadi sukar disebabkan ia amat mudah teroksida. Oleh itu, kajian kestabilan sesuatu bahan suapan boleh dianalisa dan diukur

melalui indeks pencirian aliran ( $n$ ), tenaga pengaktifan aliran ( $E$ ) dan juga indeks kebolehcuan ( $\alpha_{stv}$ ) yang mana ia akan dibincangkan di dalam bahagian seterusnya.

Ketumpatan sinter yang tinggi dapat dicapai dengan menggunakan serbuk halus. Ini adalah kerana liang zarah yang ada dapat diisi sepenuhnya oleh serbuk halus jika dibandingkan dengan serbuk kasar. Walau bagaimanapun, luas permukaan bersentuhan di antara partikel serbuk halus menghasilkan geseran yang lebih tinggi berbanding serbuk kasar. Seterusnya, permasalahan seperti penggumpalan serbuk akan berlaku semasa pengadunan yang mana serbuk logam hanya tertumpu pada sesuatu bahagian sahaja manakala dalam bahagian yang lain hanya terdapat bahan pengikat. Ini adalah ketidakhomogenan yang kebiasaan berlaku bagi penggunaan serbuk halus. Hal ini turut dialami oleh Muhamad Hussain Ismail (2002) yang mana pengadunan serbuk besi karbonil CIP-S-1641 bersaiz  $4 \mu\text{m}$  dengan bahan pengikat Hastamont EK 583 pada pembebanan serbuk 60% tidak berjaya walaupun ia berada di bawah pembebanan kritikal serbuk iaitu 69.62% isipadu. Menurut Hartwig et al. (1998), permasalahan penggumpalan serbuk logam ini boleh dielakkan melalui penggunaan mesin pengadun ricihan tinggi serta dalam jangka masa yang lama. Akan tetapi keadaan ini akan menyebabkan serbuk logam tersebut teroksida.

Terdapat dua jenis kaedah penghasilan serbuk iaitu kaedah pengatoman gas dan pengatoman air. Menurut Karatas dan Saritas (2001), serbuk logam yang berbentuk sfera dihasilkan dengan kaedah pengatoman gas, manakala serbuk logam yang berbentuk tidak sekata pula dihasilkan dengan kaedah pengatoman air. Kaedah pengatoman gas dengan ciri kesferaan serbuk logam mempunyai beberapa kelebihan antaranya ketumpatan tap yang lebih tinggi, kebolehcuan yang lebih baik dan mampu merendahkan kelikatan bahan suapan manakala kelemahannya pula ia sukar mengekalkan bentuk semasa proses penyahikatan.

Selain ketidaksekataan geometri pada serbuk logam pengatoman air, ia juga dikatakan dapat mengurangkan ketumpatan jasad sinter (German dan Hens 1992) dan sifat mekanikalnya yang lebih rendah (Gülsoy et al. 2007). Suri et al. (2005) mendapati bahawa ketumpatan yang lebih rendah dicatatkan bagi serbuk pengatoman air adalah disebabkan oleh penempatan padatannya yang rendah. Kajian beliau

seterusnya menunjukkan serbuk SS316L pengatoman air hanya boleh disinter sehingga 97% ketumpatan teori manakala serbuk SS316L pengatoman gas pula boleh disinter sehingga 99% ketumpatan teori. Hal ini telah dibuktikan melalui Khairur Rijal (2009) yang mana ketumpatan sinter bagi pengatoman gas dicatatkan pada 98.8%. Kajian yang dilakukan oleh Ryan et al. (2005) pula mendapati bahawa keliangan dan saiz liang pada sempadan bijian pengatoman air menyebabkan kemampuannya untuk bergerak agak terhad dan menyukarkannya mencapai ketumpatan sinter yang tinggi. Oleh itu, kajian yang lebih lanjut akan dilakukan bagi meningkatkan ketumpatan jasad sinter bagi serbuk SS 316L dengan mengoptimumkan parameter setiap proses di dalam kajian ini.

### **2.2.2 Bahan pengikat**

Pemilihan bahan pengikat memainkan peranan yang sangat penting kerana ia merupakan faktor kejayaan sesuatu pengacuanan itu. Bahan pengikat merupakan suatu bahan yang memegang serta membawa serbuk logam memasuki kaviti acuan dan membantu serbuk logam untuk mengikut bentuk acuan yang digunakan. Ia merupakan medium sementara untuk mengikat serbuk logam mengikut bentuk acuan sebelum ianya disingkirkan melalui proses penyahikatan (Liu et al. 2003b) dan pensinteran. Bahan pengikat merupakan aspek penentu kejayaan yang mana kebiasaannya ia dapat dilihat secara mata kasar samada berlaku kehomogenan atau tidak semasa proses pencampuran.

Menurut Goncalves (2001), bahan pengikat terbahagi kepada 4 sifat iaitu sifat aliran, interaksi serbuk, penyahikatan dan pembuatan. Manakala menurut German dan Bose (1997), bahan pengikat yang ideal terbahagi kepada beberapa kategori antaranya:-

- a. Ciri aliran
  - i. Kelikatan di bawah 10 Pa.s pada suhu pengacuan
  - ii. Perubahan kelikatan yang rendah apabila berlaku perubahan suhu semasa proses pengacuan
  - iii. Kelikatan yang cepat berubah semasa proses penyejukan
  - iv. Kuat dan tegar selepas disejukan

- v. Molekul yang kecil untuk berada di celah partikel logam serta lompang semasa mengalir
- vi. Orientasi aliran yang minimum
- b. Interaksi dengan serbuk logam
  - i. Sudut sentuhan yang rendah
  - ii. Kelekatan terhadap serbuk logam
  - iii. Pasif secara kimia, walaupun semasa tegasan tinggi dan suhu tinggi
  - iv. Stabil secara termal semasa proses pengadunan dan pengacuan
- c. Ciri penyahikatan
  - i. Terdiri daripada berbagai komponen dengan ciri-ciri yang berbeza
  - ii. Tidak menghakis, tidak toksik
  - iii. Kandungan abu yang rendah dan kandungan metalik rendah
  - iv. Suhu penguraian lebih tinggi dari suhu penyuntikan dan suhu pengadunan
  - v. Boleh terurai di bawah suhu pensinteran
  - vi. Boleh dikeluarkan sepenuhnya disebabkan serbuk logam telah memperolehi ketegapan strukturnya
- d. Ciri proses pembuatan
  - i. Murah dan mudah diperolehi
  - ii. Selamat dan mesra alam
  - iii. Tahan lama, tidak mudah resap air serta elemen yang boleh merosakkannya
  - iv. Boleh diguna semula
  - v. Sifat pelinciran yang tinggi
  - vi. Kuat dan anjal
  - vii. Konduktiviti termal yang baik
  - viii. Pekali pengembangan termal yang rendah
  - ix. Mudah larut
  - x. Rangkaian kimia yang pendek, tanpa orientasi

Bahan pengikat lazimnya terdiri daripada 3 jenis komponen iaitu tulang belakang yang bertindak membekalkan kekuatan, fasa pengisi bagi memudahkan pengeluaran pada fasa pertama pengeluaran dan juga agen pembasah yang

menghubungkan bahan pengikat dan serbuk logam (German dan Bose 1997). Menurut German dan Bose (1997), terdapat lima jenis pengelasan bahan pengikat iaitu:-

- i. Campuran termoplastik
- ii. Campuran termoset
- iii. Campuran berasaskan air
- iv. Campuran berasaskan gelatin
- v. Bahan tidak organik

Di dalam kajian ini, bahan pengikat yang akan digunakan adalah PEG dan PMMA di mana PEG mempunyai sifat kebolehlarutan air yang tinggi serta pelinciran yang baik. Bahan ini juga tidak bertoksid dan mudah terurai pada suhu tidak melebihi 200°C. Manakala bahan pengikat PMMA pula mampu mengurangkan pengecutan jasad serta terurai pada suhu yang rendah tidak melebihi 180°C. Sistem bahan pengikat PEG/PMMA ini telah mula diperkenalkan oleh Cao et al. (1992). Beliau merupakan individu pertama yang membuat penyelidikan berkenaan sistem bahan pengikat ini diikuti oleh Anwar et al. (1995b), Bakan et al. (1998), Mohd Afian Omar (1999), Murtadhahadi (2006) dan Khairur Rijal (2009). German dan Cornwall (1997) menyatakan bahawa pemilihan bahan pengikat yang sesuai adalah berdasarkan berat molekul setiap komponen. Bagi PEG sahaja, terdapat berbagai-bagai gred molekul. Menurut Anwar et al. (1995a) sekiranya PEG bermolekul rendah digunakan, pengaliran bahan suapan mampu ditingkat ekoran kelikatannya yang rendah. Akan tetapi ini akan mengakibatkan jasad anum yang terhasil agak lembut dan mudah meleding semasa proses penyahacuan. Sekiranya PEG bermolekul tinggi pula digunakan, pengacuan akan menjadi semakin sukar akibat peningkatan kelikatan. Maka jasad anum yang lebih keras dapat dihasilkan tanpa menyebabkan jasad anum tersebut bengkok semasa dikeluarkan dari acuan.

Bagi sistem bahan pengikat, agen pengaktif permukaan merupakan antara faktor yang penting di dalam sesuatu pencampuran yang homogen. Pada awal kajian Mohd Afian Omar (1999), beliau tidak menggunakan agen pengaktif yang mana bahan suapan yang terhasil tidak homogen serta berketul-ketul. Maka beliau telah menyarankan kandungan asid stearik hendaklah ditambah kira-kira 2% bagi menghasilkan bahan suapan yang homogen, lembut serta mudah dikeluarkan daripada

acuan. Agen pengaktif permukaan seperti asid stearik berupaya untuk mengurangkan kelikatan adunan yang mana ia akan meningkatkan kandungan pepejal adunan tersebut dengan menghasilkan tautan di antara permukaan serbuk logam dan bahan pengikat. Hal ini penting di dalam Mikro MIM agar bahan suapan yang terhasil akan membentuk padatan yang bebas dari sebarang kecacatan. Seterusnya Li et al. (2007a) telah menggunakan PEG dengan berat molekul yang lebih tinggi. Hasil kajian beliau mendapati bahawa kelikatan bahan suapan berjaya direndahkan bagi memudahkan proses pengacuanan suntikan mikro. Li et al. (2007a) mendapati bahawa penambahan asid stearik daripada 2% kepada 8% terhadap serbuk keluli 17-4PH mampu mengurangkan sudut pembasahan bahan suapan tersebut. Di samping itu, pembebanan kritikal serbuk berjaya ditingkatkan bagi mengurangkan peratus pengecutan jasad mikro.

Secara keseluruhannya, terdapat empat sistem bahan pengikat yang telah dipatenkan iaitu Rivers, Weich, BASF dan SPS (Muhammad Hussain 2002). Sistem bahan pengikat berasaskan paten Weich banyak digunakan oleh Glabus et al. (1995), Angermenn dan Biest (1994), Chai dan German (1993), Japka dan German (1991). Kebanyakan penyelidik lebih tertumpu kepada aspek penjimatan masa khususnya semasa penyahikatan Lin et al. (1991), Biala (1994), Bakan et al. (1998). Sebagai contoh, Lin et al. (1991) telah menggunakan serbuk karbonil dengan sistem bahan pengikat BASF. Hasilnya pemisahan bahan pengikat berjaya dikurangkan akan tetapi ia memerlukan relau penyahikatan khas yang mengandungi campuran nitrogen dan asid nitrik. Duncavage et al. (1993) telah menggunakan sistem bahan pengikat PP dan SA. Seterusnya Bakan et al. (1998) telah menggunakan sistem bahan pengikat PEG dan PMMA dengan komposisi 80/20. Hasilnya proses pengacuanan berjalan lancar tetapi ketumpatan jasad anum yang rendah dicatatkan.

Beberapa penyelidik tempatan membuat kajian menggunakan sistem bahan pengikat antaranya stearin sawit dan minyak kelapa. Penggunaan stearin sawit dan minyak kelapa sebagai bahan pengikat MIM telah digunakan oleh Alfian Hamsi (1998), Norhamidi et al. (2000) dan Iriany (2002) yang mana ia telah diadunkan dengan polietilena dan polipropilena pada komposisi yang pelbagai. Ini disebabkan oleh sifat reologinya yang baik serta kos penghasilannya yang sangat murah. Hal ini

telah menarik minat penyelidik lain antaranya Istikamah Subuki et al. (2005, 2006), Mohd Afian Omar (2007) dan Ismail et al. (2007). Bahan pengikat polimer polietilena dan polipropilena akan bertindak sebagai bahan pengikat tulang belakang (primer) manakala stearin sawit sebagai bahan pengikat boleh larut (sekunder) yang akan dinyahikatkan sebelum proses pirolisis terma dilakukan. Penggunaan sistem bahan pengikat ini berjaya menunjukkan sifat reologi yang baik dimana nilai indeks tingkahlaku alirannya berada di antara 0.3 hingga 0.5, menunjukkan bahan suapan ini mempunyai sifat pseudoplastik. Selain daripada itu juga, kelikatan bahan suapan tersebut adalah kurang dari 1000 Pa.s manakala kadar ricihnya di antara 100 hingga 10,000  $s^{-1}$  seperti yang disarankan oleh German dan Bose (1997). Komposisi bahan suapan menunjukkan ketidakbergantungannya terhadap perubahan suhu akibat tenaga pengaktifannya yang rendah. Menurut Bilovol et al. (2003), bahan suapan MIM yang baik hendaklah mempunyai indeks tingkahlaku aliran yang rendah iaitu kepekaan bahan suapan terhadap perubahan kadar ricih serta nilai tenaga pengaktifan yang rendah (kurang kepekaan terhadap perubahan suhu). Di dalam mikro MIM, hal ini adalah penting kerana perubahan yang kecil mampu menyukarkan proses pengacuanan.

Hooman (2009) telah menggunakan sistem bahan pengikat kanji iaitu sistem yang boleh larut di dalam air. Dua jenis kanji digunakan oleh beliau iaitu kanji ubi kayu asli dan Purity-D (sejenis ubi kayu yang telah diubahsuai). Untuk mendapatkan kanji yang bersifat kebolehaliran yang baik serta bersifat termoplastik, beliau telah menambah gliserol sebagai bahan pemplastik kanji. Ujian relogi berjaya merekodkan kelikatan yang rendah dan bahan suapan bersifat pseudoplastik. Nilai indeks kebolehaliran serta nilai tenaga pengaktifan berada di dalam julat yang sesuai bagi proses pengacuanan suntikan logam. Kajian beliau juga berjaya menghasilkan komponen yang bebas kecacatan.

Dalam kajian yang lain, Setasuwon et al. (2008) telah memformulasikan tiga jenis bahan pengikat berasaskan minyak/lilin untuk bahan suapan MIM. Ia disediakan dengan mengadunkan berketumpatan rendah dengan lilin parafin, asid stearik dan minyak kelapa sawit gred makanan. Kajian beliau mendapati bahawa tempoh penyahikatan hampir 19 jam diperlukan bagi menyahikatkan sistem bahan pengikat



daripada komponen. Walaupun kos bahan pengikat dan prosesnya adalah murah tetapi tempoh penyahikatan yang terlalu lama diperlukan. Ini agak bertentangan dengan pemikiran penyelidik di dalam MIM.

Omar et al. (2001) pula mendapati bahawa pengurangan PMMA dalam bahan suapan dapat mengurangkan tempoh penyahikatan terma serta dapat mempercepatkan proses pengeluaran PEG semasa proses penyahikatan larutan. Akan tetapi pengurangan komposisi PMMA akan mengurangkan kekuatan lentur jasad anum serta jasad perang. Ini adalah kerana kandungan PMMA yang bertindak sebagai bahan pengikat tulang belakang telah pun berkurangan. Selain daripada itu juga, beliau mendapati bahawa tempoh yang lebih lama diperlukan untuk mengeluarkan jasad anum daripada acuan.

Seterusnya Li et al. (2003a) telah memperkenalkan bahan pengikat baru bagi proses penyuntikan acuan logam ini. Bahan pengikat yang dibangunkan ini adalah adunan lilin, minyak dan polietilena bagi mengikat serbuk nikel dan besi karbonil. Bagi logam-logam reaktif seperti titanium, zirkonium, niobium, tungsten dan molibdenum, bahan pengikat yang bersesuaian perlu digunakan bagi mengelakkan pengoksidaan pada suhu yang tinggi. Oleh itu, Weil et al. (2006) telah mengkaji jenis bahan pengikat terkini yang sesuai digunakan untuk jenis-jenis logam tersebut. Kajiannya telah berjaya membangunkan sistem bahan pengikat beraroma MIM bagi logam-logam tersebut. Bahan pengikat utama iaitu naptalena, bahan pengikat kedua asid stearik dan etilena vinil asitat (EVA) digunakan sebagai bahan penambah didapati sesuai digunakan dengan nisbah pembebanan serbuk logam titanium yang bersaiz purata  $7.7 \mu\text{m}$  pada 65% isipadu. Analisis TGA dan kajian pengeringan vakum mendapati bahawa naptalena boleh dinyahikatan dengan mudah serta meninggalkan sedikit EVA sebagai polimer tulang belakang.

### **2.2.3 Penentuan beban serbuk**

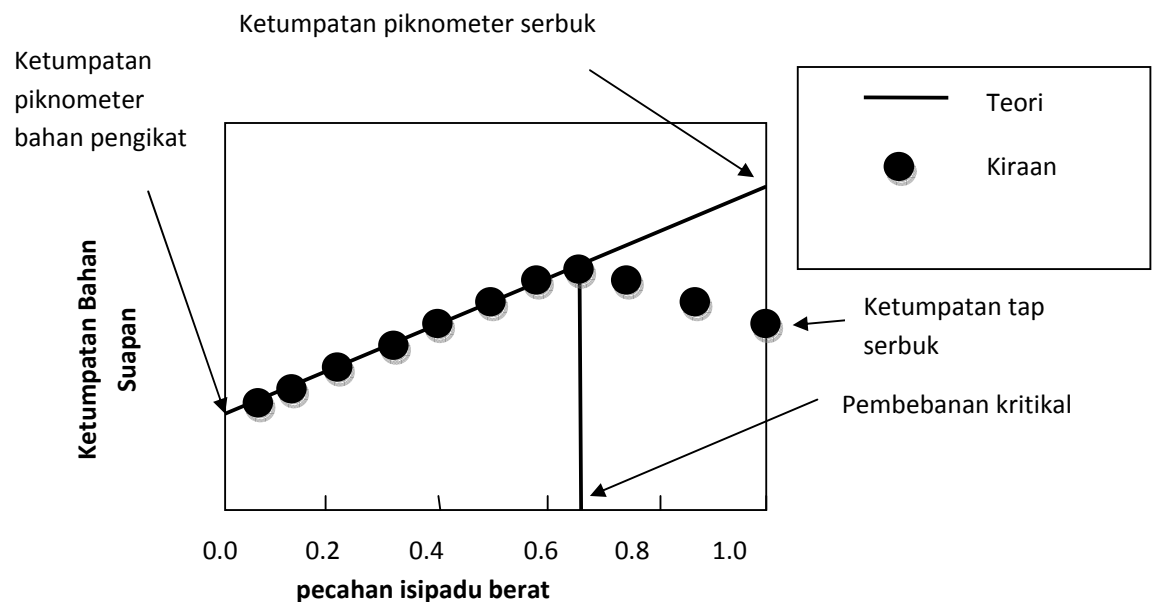
Beban serbuk bahan suapan adalah merujuk kepada nisbah di antara isipadu serbuk logam dengan bahan pengikat yang digunakan. Menurut German dan Bose (1997), beban serbuk optimum bagi bahan suapan MIM adalah sebanyak 2 – 5% isipadu lebih

rendah dari beban serbuk kritikal serbuk logam. Beban serbuk kritikal pula adalah bergantung kepada jenis serbuk logam serta bahan pengikat yang digunakan, saiz partikel serbuk serta bentuknya, interaksi di antara serbuk logam dengan bahan pengikat, dan suhu adunan (Shengjie et al. 2006). Nisbah beban serbuk adalah penting bagi menghasilkan bahan suapan yang sempurna dan homogen. Kekurangan bahan pengikat akan menyukarkan proses penyuntikan akibat kelikatan yang tinggi. Manakala jika bahan pengikat berlebihan, ia akan memanjangkan proses penyahikatan serta kadar pengecutan yang tinggi akan berlaku.

Menurut Reddy et al. (1996) dan Li et al. (2003b), pengukuran beban serbuk kritikal boleh dilakukan dengan menggunakan asid oleik di mana ia akan ditambah secara berkala ke dalam serbuk logam keluli tahan karat. Peratus pembebanan kritikal serbuk logam dicatatkan apabila bacaan daya kilas pada reometer kilasan mencapai tahap tertinggi. Pada permulaan pengukuran, daya kilas akan meningkat dengan pertambahan asid oleik. Walaubagaimanapun, nilai tersebut akan terhenti pada suatu selang masa di mana asid oleik telah menyelaputi keseluruhan permukaan serbuk logam. Nilai tersebut akan menunjukkan penurunan apabila kuantiti asid oleik ditambah.

Penentuan pembebanan serbuk kritikal adalah penting bagi menghasilkan jasad anum serta jasad sinter yang tinggi ketumpatannya serta peratusan kadar pengecutan padatan dapat dikurangkan. Kebiasaannya serbuk logam bersaiz mikro akan memberikan pembebanan kritikal serbuk yang lebih rendah berbanding dengan serbuk logam yang bersaiz lebih besar. Berbanding dengan serbuk logam bersaiz lebih besar, pembebanan serbuk akan semakin meningkat disebabkan ruang-ruang antara padatan lebih besar (Agote et al. 2001). Begitu juga dengan taburan saiz serbuk ( $S_w$ ) yang mana taburan saiz serbuk yang lebih lebar akan meningkatkan pembebanan kritikal serbuk logam. Ini adalah antara cabaran yang harus dihadapi semasa penggunaan serbuk logam bersaiz mikro. Penggunaan serbuk logam bersaiz mikro akan memberikan pembebanan yang lebih rendah yang akan memberi kesan kepada ketumpatan akhir dan kadar pengecutan jasad sinter.

Kaedah pembebanan serbuk kritikal ini pada permulaannya telah diguna pakai oleh Hens dan German (1993) di mana beliau hanya menggunakan bahan pengikat PEG sebagai agen pembasah serbuk logam. Kajian beliau mendapati bahawa peratusan pembebanan kritikal serbuk logam hanya bergantung kepada jenis bahan pengikat serta kandungan agen pembasah permukaan yang digunakan. Reddy et al. (1996) telah menggunakan reometer kilasan model Brabender PL-2000-3 dengan menggunakan minyak *linseed* iaitu daripada biji rami yang dikeringkan sebagai agen pembasah. Kajian beliau mendapati bahawa halaju putaran memberi kesan terhadap perubahan pembebanan serbuk kritikal. Seterusnya pada tahun 1997, German dan Bose telah menjalankan kajian seterusnya dan mendapati bahawa pembebanan optimum serbuk logam hendaklah berada di antara 2-5% daripada pembebanan kritikal sesuatu serbuk logam. Bagi memudahkan cara, mereka telah mereka bentuk lengkung pembebanan kritikal bagi komposisi serbuk logam-bahan pengikat seperti di dalam Rajah 2.3. Menurut German dan Bose (1997), beban serbuk kritikal yang ditunjukkan oleh rajah tersebut adalah merujuk kepada keadaan di mana zarah-zarah serbuk logam tersusun padat dan semua ruang di antara serbuk logam dianggap terisi dengan bahan pengikat.



Rajah 2.3 Lengkung pembebanan serbuk bagi serbuk logam-bahan pengikat

Sumber : German dan Bose 1997

## 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 composition 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. & Duszczyk, 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.