

PENILAIAN KELAKUAN HASIL KIMPALAN
GESERAN UNTUK LOGAM KEPADA LOGAM (Cu-
KELULI DAN Al-KELULI) DAN SERAMIK KEPADA
LOGAM (Al_2O_3 -Al)

oleh

YEOH CHEOW KEAT

Tesis diserahkan untuk memenuhi keperluan bagi Ijazah
Sarjana Sains

April 2004

PENGHARGAAN

Pertama sekali, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada Profesor Madya Dr. Zainal Arifin Ahmad sebagai Penyelia Projek di atas tunjuk ajar, nasihat dan cadangan yang disumbangkan sepanjang pengajian saya.

Ucapan terima kasih juga diajukan kepada Pusat Pengajian Kejuruteraan Bahan & Sumber Mineral kerana memberi peluang kepada saya belajar di sini. Saya terhutang budi kepada Dekan, Timbalan Dekan-Timbalan Dekan, pensyarah-pensyarah khususnya Profesor Madya Dr. Shamsul Baharin Jamaludin yang telah menyumbang idea dan perbincangan berguna kepada projek ini, serta kakitangan pusat pengajian yang sentiasa sanggup membantu. Terima kasih juga kepada pihak USM yang mebiayai pengajian saya melalui biasiswa Skim Pasca Siswazah.

Terima kasih kepada Pembantu Teknik (Encik Khairul Nasrin Abas) juruteknik yang banyak membantu terutama sekali En. Shahrul Ami Zainal Abidin, Pn. Fong Lee Lee, En. Che Idrus, En. Hasnor Husin, En. Saarani Ijak, En. Kemuridan Md. Desa, En. Gnasegaram, En. Mohammad Hassan, En. Md. Zandar, En. Shahid Abdul Jalal, En. Mohd. Sayuti Azeman, En. Abdul Rashid Selamat, En. Abdul Razak Embi, Cik Mahani Mohd., En. Mohd. Helmi Khir, Puan Hasnah Awang dan En. Mokhtar Mohamad. Saya sangat berterima kasih kepada pekerja-pekerja dari Loh Sine Machine & Electrical Repairer atas segala bantuan semasa pengubahsuaian mesin larik.

Saya juga ingin berterima kasih kepada ibubapa saya kerana memberi sokongan moral sepanjang tempoh pengajian saya. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada semua kawan-kawan saya, Balakrisnan, En. Nazri, Julie Juliewatty, Khairul Rafezi, Mohd. Al-Amin, Mohd. Nazree Derman, Shah Rizal Kasim dan Wan Arif yang telah memberi bantuan kepada saya secara langsung atau tidak langsung.

Sekian. Terima kasih.

Yeoh Cheow Keat

KANDUNGAN

mukasurat

PENGHARGAAN	ii
KANDUNGAN	iv
SENARAI RAJAH	vii
SENARAI JADUAL	xii
ABSTRAK	xiv
ABSTRACT	xvi
Bab 1 Pengenalan	1
1.1 Sambungan seramik kepada logam dan proses kimpalan geseran	1
1.1.1 Kepentingan sambungan seramik kepada logam	2
1.1.2 Proses-proses penyambungan seramik kepada logam	3
1.1.3 Kimpalan geseran	6
1.1.4 Kepentingan pengoptimuman parameter proses untuk kimpalan geseran	7
1.2 Objektif penyelidikan	9
1.2.1 Peringkat-peringkat utama penyelidikan	9
Bab 2 Kajian persuratan	12
2.1 Pengenalan	12
2.2 Sejarah awal penyelidikan tentang kimpalan geseran dan penyambungan seramik kepada logam	13
2.2.1 Kajian awal tentang kimpalan geseran	14
2.2.2 Kimpalan geseran seramik kepada logam (dekad selepas 90an)	16
2.3 Pemahaman tentang kimpalan geseran dan penggunaannya untuk menyambung seramik kepada logam	17
2.3.1 Kimpalan geseran logam kepada logam	17
2.3.1(a) Mekanisme penyambungan untuk sambungan logam kepada logam	18

2.3.1(b)	Pengoptimuman parameter proses dalam kimpalan geseran	22
2.3.1(c)	Sifat-sifat sambungan logam kepada logam yang disediakan melalui kimpalan geseran	25
2.3.2	Kimpalan geseran sebagai proses penyambungan seramik kepada logam	41
2.4	Ringkasan	43
Bab 3	Bahan dan Kaedah	44
3.1	Pengenalan	44
3.2	Pengubahsuaian mesin larik	44
3.3	Kimpalan geseran logam kepada logam	46
3.3.1	Logam	48
3.3.2	Rekabentuk ujikaji	50
3.3.2	Penyediaan spesimen	53
3.4	Kimpalan geseran logam kepada seramik	54
3.4.1	Bahan	55
3.4.2	Penyediaan sampel	57
3.5	Analisis	58
3.5.1	Ujian tegangan	58
3.5.2	Ujian lenturan	60
3.5.3	Analisis permukaan patah	61
3.5.4	Mikroskopi optik	62
3.5.4	Mikroskopi elektron menggunakan mikroskop imbasan elektron (SEM)	63
3.5.5	Ujian kekerasan mikro	63
Bab 4	Keputusan dan Perbincangan	64
4.1	Kimpalan geseran logam kepada logam	65
4.1.1	Sambungan Cu-St	65
4.1.1(a)	Kekuatan tegangan	65
4.1.1(b)	Analisis permukaan patah	73
4.1.1(c)	Pemerhatian antaramuka sambungan	78
4.1.1(d)	Ujian kekerasan	87
4.1.2	Sambungan Al-St	90
4.1.2(a)	Kekuatan tegangan	90
4.1.2(b)	Analisis permukaan patah	94
4.1.2(c)	Pemerhatian antaramuka sambungan	97
4.1.2(d)	Ujian kekerasan	104
4.2	Kimpalan geseran Al-Al ₂ O ₃	106
4.2.1	Ujian lenturan	106
4.2.2	Analisis permukaan patah	109
4.2.3	Pemerhatian antaramuka sambungan	112
4.2.4	Ujian kekerasan	116
4.3	Perbandingan antara sambungan logam kepada logam dengan seramik kepada logam	118
Bab 5	Kesimpulan & Cadangan	120

RUJUKAN

122

Lampiran A – Contoh kaedah statistik yang digunakan:

Ujian-*t*

134

Lampiran B - Penerbitan

139

SENARAI RAJAH

mukasurat

Rajah 1.1	Perbandingan (a) ketegaran dan (b) kekuatan seramik kejuruteraan dengan bahan kejuruteraan yang lain (Ashby, 1996)	3
Rajah 1.2	Perbandingan CTE di antara beberapa seramik terpilih dengan logam (Howe, 1993). Kebanyakan logam mempunyai CTE yang berbeza daripada seramik.	4
Rajah 1.3	(a) Kimpalan geseran jenis linear atau pacuan terus, (b) kimpalan geseran jenis linear, (c) kimpalan geseran jenis jejarian dan (b) kimpalan geseran jenis orbital.	7
Rajah 1.4	Carta alir menunjukkan peringkat-peringkat utama dalam (a) ujikaji kimpalan geseran logam-logam berbeza dan (b) ujikaji kimpalan geseran logam kepada seramik.	10
Rajah 2.1	Jumlah penerbitan dalam kimpalan geseran dan penyambungan seramik.	13
Rajah 2.2	Beberapa jenis proses penyambungan (Schwartz, 1969).	18
Rajah 2.3	Kedudukan proses parameter utama dalam peringkat-peringkat kimpalan geseran pacuan terus (Linnert, 1994).	23
Rajah 3.1	Mesin larik yang diubahsuai untuk tujuan kimpalan geseran.	45
Rajah 3.2	Carta alir menunjukkan ujikaji-ujikaji yang dijalankan untuk kimpalan geseran logam kepada logam.	48
Rajah 3.3	Mikrostruktur logam-logam yang digunakan. (a) Keluli pada pembesaran asal 200X, (b) tembaga pada pembesaran asal 100X dan (c) aluminium pada pembesaran asal 200X.	51
Rajah 3.4	Bentuk sampel logam untuk kimpalan geseran.	54

Rajah 3.5	Carta alir menunjukkan bahagian-bahagian utama dalam ujikaji melibatkan sambungan logam kepada seramik.	55
Rajah 3.6	Mikrostruktur rod alumina yang digunakan (pembesaran asal 1000X).	56
Rajah 3.7	Sarung loyang untuk memegang rod seramik semasa kimpalan geseran.	57
Rajah 3.8	Bentuk spesimen yang disediakan (a) selepas disambung, (b) selepas dimesin untuk ujian tegangan, dan (c) spesimen piawai ASTM.	59
Rajah 3.9	Kesan pemesinan atas bentuk spesimen ujian lenturan.	60
Rajah 3.10	(a) Dimensi spesimen ujian lenturan dan (b) kedudukan pembebanan untuk ujian lenturan 4-titik.	61
Rajah 4.1	Kegagalan mod bercampur dalam sambungan logam kepada logam seperti ditunjukkan lengkung pembebanan yang bukan linear.	66
Rajah 4.2	Kekuatan sambungan yang disediakan menggunakan kelajuan putaran 1800 rpm lebih tinggi daripada yang disediakan menggunakan kelajuan putaran 900 rpm.	68
Rajah 4.3	Kekuatan tegangan melawan tekanan tempaan.	69
Rajah 4.4	Kaitan mungkin antara keputusan kajian dengan keputusan Sahin <i>et al.</i> (1998). Kekuatan tegangan meningkat dengan pertambahan kelajuan putaran pada julat kajian ini tetapi mula menurun selepas suatu nilai maksimum dalam julat kajian Sahin <i>et al.</i> (1998).	72
Rajah 4.5	Contoh permukaan patah sambungan Cu-St menunjukkan ciri-ciri koyakan, belahan dan gabungan liang-liang mikro.	75
Rajah 4.6	(a) Rupabentuk permukaan patah sambungan Cu-St. (b) Kandungan Fe tinggi di kawasan A, dan (c) kandungan Cu tinggi di kawasan B.	76
Rajah 4.7	(a) Antaramuka ¹ sambungan aloi tembaga kepada keluli analisis EDX pada (b) bahagian A, (c) bahagian B, (d) bahagian C serta (e) bahagian D. Kesan resapan tidak jelas. Kandungan Cu tinggi di kawasan A dan B manakala kandungan Fe tinggi di kawasan C dan D.	77
Rajah 4.8	Pengimejan BSE sambungan Cu-St pada pembesaran asal 8390X. Tiada perbezaan komposisi berdekatan garis sambungan dapat dikesan pada pembesaran ini.	79

Rajah 4.9	Contoh pencampuran mekanikal yang mungkin disebabkan ubahbentuk dan aliran plastik. Liang juga diperhatikan pada sambungan Cu-St.	79
Rajah 4.10	Sambungan Cu-St yang disediakan menggunakan tekanan tempaan 90 MPa dan kelajuan putaran (a) 900 rpm, (b) 1250 rpm, dan (c) 1800 rpm. Sambungan tidak lengkap (kawasan hitam pada garis sambungan) lebih mudah diperhatikan pada sampel (a) berbanding sampel (b).	81
Rajah 4.11	Sambungan Cu-St yang disediakan menggunakan kelajuan putaran 1250 rpm serta tekanan tempaan (a) 70 MPa, (b) 90 MPa dan (c) 110 MPa. Sambungan tidak lengkap kurang diperhatikan dalam ketiga-tiga sampel.	82
Rajah 4.12	Rupabentuk sambungan Cu-St selepas punaran. Pembesaran asal 100X. Perubahan mikrostruktur pada sambungan tidak dapat diperhatikan dengan jelas.	84
Rajah 4.13	Ubahbentuk bahagian keluli diperhâtikan pada sambungan Cu-St yang disediakan pada kelajuan putaran 1250 rpm dan tekanan tempaan 90 MPa. Pembesaran asal 500X.	84
Rajah 4.14	Saiz ira melawan jarak dari garis antaramuka sambungan Cu-St apabila (a) tekanan dikekalkan, kelajuan diubah (b) tekanan diubah, kelajuan dikekalkan. Tiada perubahan jelas dapat diperhatikan dalam saiz ira. Garisan putus-putus mewakili saiz ira bahan induk sebelum kimpalan geseran.	86
Rajah 4.15	Keputusan ujian kekerasan sambungan Cu-St yang disediakan menggunakan tekanan tempaan 90 MPa dan kelajuan putaran 1250 rpm. Garisan putus-putus mewakili kekerasan bahan induk sebelum kimpalan geseran.	87
Rajah 4.16	Taburan yang lebar dalam keputusan menyukarkan pengenalpastian kesan perubahan kelajuan putaran terhadap kekuatan tegangan untuk sambungan Al-St.	92
Rajah 4.17	Taburan yang lebar dalam keputusan menyukarkan pengenalpastian kesan perubahan tekanan tempaan terhadap kekuatan tegangan sambungan Al-St.	93
Rajah 4.18	(a) Contoh permukaan patah sambungan Al-St. (b) Kandungan Al tinggi diperhatikan pada bahagian A dan (c) kandungan Fe tinggi pada bahagian B.	96
Rajah 4.19	Contoh permukaan patah sambungan Al-St menunjukkan ciri-ciri belahan, koyakan dan penggabungan liang-liang mikro.	97

Rajah 4.20	(a) Antaramuka sambungan aloi aluminium dengan keluli dan analisis EDX pada (b) bahagian A, (c) bahagian B, (d) bahagian C dan (e) bahagian D.	98
Rajah 4.21	Sambungan Al-St disediakan pada tekanan tempaan 70 MPa dan kelajuan putaran (a) 900 rpm, (b) 1250 rpm dan (c) 1800 rpm.	100
Rajah 4.22	Sambungan Al-St disediakan pada kelajuan putaran 1250 rpm dan tekanan tempaan (a) 50 MPa, (b) 70 MPa dan (c) 90 MPa.	101
Rajah 4.23	Gambar sambungan disediakan menggunakan tekanan tempaan 70 MPa dan kelajuan putaran 1250 rpm menunjukkan ubahbentuk ira pada bahagian aluminium.	102
Rajah 4.24	Sambungan aloi aluminium kepada keluli yang disediakan pada pembesaran asal 500X.	102
Rajah 4.25	Saiz ira melawan jarak dari garis sambungan Al-St apabila (a) tekanan, P , dikekalkan, kelajuan, S , diubah (b) tekanan, P , diubah, kelajuan, S , dikekalkan.	103
Rajah 4.26	Keputusan ujian kekerasan sambungan Al-St.	104
Rajah 4.27	Keputusan ujian lenturan 4-titik untuk sambungan Al-Al ₂ O ₃ . Walaupun terdapat taburan yang lebar, seperti dijangka untuk sampel seramik, julat kekuatan pada kelajuan putaran 900 rpm jelas lebih rendah berbanding julat kekuatan pada 1800 rpm. Kekuatan lenturan bertambah dengan peningkatan kelajuan putaran.	108
Rajah 4.28	Lengkung pembebanan melawan pemanjangan menunjukkan tiada tanda-tanda alahan pada sambungan. Kegagalan sambungan mungkin pada antaramuka sambungan atau melalui bahagian Al ₂ O ₃ .	109
Rajah 4.29	Spesimen ujian lenturan diperhatikan gagal melalui bahagian Al ₂ O ₃ .	110
Rajah 4.30	Contoh permukaan patah yang menunjukkan ciri-ciri patah antara butir.	111
Rajah 4.31	Contoh permukaan patah yang menunjukkan tanda-tanda pembelahan butir.	111
Rajah 4.32	Sambungan Al-Al ₂ O ₃ disediakan pada kelajuan putaran (a) 900 rpm, (b) 1250 rpm dan (c) 1800 rpm.	113

Rajah 4.33	Penyambungan tidak lengkap pada bahagian tepi sambungan. Kecacatan berbentuk takukan ini mungkin memberi kesan positif terhadap kekuatan sambungan.	114
Rajah 4.34	Penguncian mekanikal pada antaramuka sambungan diperhatikan sebagai antaramuka bukan linear.	114
Rajah 4.35	Keputusan ujian kekerasan mikro untuk sambungan yang disediakan menggunakan kelajuan putaran (a) 900 rpm, (b) 1250 rpm dan (c) 1800 rpm.	115
Rajah 4.36	Kehadiran liang mungkin memberi kesan terhadap kekerasan mikro yang diukur. Lekukan yang tidak mengena bahagian berliang (a) mungkin lebih kecil berbanding lekukan yang mengena bahagian berliang (b).	117

SENARAI JADUAL

	mukasurat
Jadual 3.1	Perbandingan sifat-sifat mekanikal dan fizikal terpilih untuk logam yang digunakan (Ashby, 1996). 49
Jadual 3.2	Beberapa sifat mekanikal logam yang digunakan. 50
Jadual 3.3	Keputusan XRF untuk sampel-sampel logam yang digunakan. 50
Jadual 3.4	Tiga peringkat yang diuji untuk (a) kimpalan keluli lembut kepada tembaga, dan (b) kimpalan keluli lembut kepada aloi aluminium. 53
Jadual 3.5	Perbezaan sifat-sifat aluminium dengan alumina (Ashby, 1996). 56
Jadual 3.6	Larutan punaran yang digunakan. 62
Jadual 4.1	Analisis varians keputusan ujian tegangan untuk sambungan Cu-St. 70
Jadual 4.2	Perbandingan antara keputusan kajian lepas dengan ramalan berdasarkan persamaan 4.1. 71
Jadual 4.3	Rupabentuk permukaan patah untuk sambungan Cu-St yang disediakan dengan kelajuan putaran, S , dan tekanan tempaan, P , berbeza. Tiada kaitan dapat diperhatikan antara perubahan kelajuan putaran dan/atau tekanan tempaan dengan rupa permukaan patah. 74
Jadual 4.4	Keputusan ujian kekerasan apabila (a) tekanan dikekalkan 90 MPa, kelajuan diubah dan (b) tekanan diubah, kelajuan dikekalkan 1250 rpm. 88

Jadual 4.5	Ujian- <i>t</i> membandingkan kekerasan sampel, k_1 , dengan kekerasan logam induk, k_0 , menggunakan hipotesis nol, h_0 : $k_1 = k_2$ dan $\alpha = 0.05$. Kesan terhadap kekerasan apabila (a) kelajuan, S , diubah; tekanan tempaan, P , dikekalkan 90 MPa dan (b) kelajuan, S , dikekalkan 1250 rpm, tekanan tempaan, P , diubah.	88
Jadual 4.6	Analisis varians untuk keputusan ujian tegangan sambungan Al-St.	91
Jadual 4.7	Rupabentuk permukaan patah untuk sambungan Al-St yang disediakan dengan kelajuan putaran, S , dan tekanan tempaan, P , yang berbeza. Tiada perubahan jelas dalam rupa permukaan patah dapat diperhatikan untuk perubahan kelajuan putaran atau tekanan tempaan.	95
Jadual 4.8	Keputusan ujian kekerasan apabila (a) tekanan dikekalkan 70 MPa, kelajuan, S diubah dan (b) tekanan, P diubah, kelajuan dikekalkan 1250 rpm.	105
Jadual 4.9	Ujian- <i>t</i> membandingkan kekerasan sampel, k_1 , dengan kekerasan logam induk, k_0 , menggunakan hipotesis nol, h_0 : $k_1 = k_2$ dan $\alpha = 0.05$. Kesan terhadap kekerasan apabila (a) kelajuan, S diubah, tekanan tempaan dikekalkan 70 MPa dan (b) kelajuan dikekalkan 1250rpm, tekanan tempaan, P diubah.	105
Jadual 4.10	ANOVA untuk keputusan ujian lenturan sambungan Al-Al ₂ O ₃ . Nilai kebarangkalian $> F$ yang kecil ini menunjukkan bahawa perubahan kelajuan putaran memberi kesan yang bererti dari segi statistik terhadap kekuatan lenturan.	109
Jadual 4.11	Permukaan patah sambungan Al-Al ₂ O ₃ . Perubahan kelajuan putaran tidak memberi kesan terhadap rupa permukaan patah.	110
Jadual 4.12	(a) Nilai purata kekerasan mikro bahagian Al sambungan sambungan Al-Al ₂ O ₃ dan (b) ujian- <i>t</i> menunjukkan kekerasan Al disambung lebih rendah berbanding bahan induk.	118

ABSTRAK

Penyambungan seramik kepada logam penting untuk menggabungkan kekuatan suhu tinggi, rintangan haus dan kakisan, serta sifat seramik yang ringan dengan keliatan dan kebolehmesinan komponen logam. Sebagai proses penyambungan keadaan pepejal, kimpalan geseran sangat sesuai untuk penyambungan bahan dengan sifat terma dan mekanikal yang jauh berbeza, seperti logam dan seramik. Objektif tesis ini adalah menilai kimpalan geseran logam kepada logam dan seramik kepada logam. Kajian dimulakan dengan penilaian hasil kimpalan geseran antara tembaga dengan keluli (Cu-St) serta aluminium dengan keluli (Al-St) sebelum diteruskan dengan kimpalan geseran aluminium kepada alumina. Sambungan-sambungan disediakan menggunakan kelajuan putaran dan tekanan tempaan yang berbeza. Kelajuan putaran yang digunakan ialah 900 rpm, 1250 rpm dan 1800 rpm, sementara tekanan tempaan yang digunakan dalam julat 50 MPa sehingga 110 MPa, bergantung kepada bahan yang disambung. Sambungan Cu-St menunjukkan kekuatan tegangan bertambah dengan peningkatan kelajuan putaran. Perubahan tekanan tempaan tidak memberi kesan yang bererti terhadap kekuatan tegangan. Kekuatan tegangan sambungan Cu-St lebih rendah berbanding logam induk mungkin disebabkan penyambungan tidak lengkap pada antaramuka sambungan. Perubahan kelajuan putaran dan tekanan tempaan tidak memberi kesan bererti terhadap kekuatan tegangan sambungan Al-St. Sambungan Al-St mempunyai kekuatan lebih rendah berbanding bahan induk yang mungkin disebabkan pembentukan sebatian antaralogam atau kesan haba terhadap kawasan berhampiran sambungan.

Penyambungan tidak lengkap tidak diperhatikan pada antaramuka sambungan Al-St. Kekuatan lenturan sambungan Al-Al₂O₃ bertambah dengan penambahan kelajuan putaran. Patah berlaku melalui bahagian Al₂O₃. Kekuatan lenturan sambungan lebih rendah berbanding bahan induk Al₂O₃ yang digunakan. Penyambungan tidak lengkap pada bahagian tepi sambungan mungkin memberi kesan terhadap kekuatan sambungan. Terdapat taburan yang lebar dalam keputusan ujian kekerasan. Kesimpulannya, sambungan seramik kepada logam mempunyai sifat-sifat yang sangat berbeza daripada sambungan logam kepada logam.

EVALUATION OF THE PROPERTIES OF FRICTION WELDS BETWEEN METAL TO METAL (Cu-STEEL AND Al-STEEL) AND CERAMIC TO METAL (Al₂O₃-Al)

ABSTRACT

Joining metals to ceramics is important because it allows the superior high temperature properties, wear and corrosion resistance, as well as the low weight of ceramics to be combined with tough, easy-to-machine metal parts. As a solid state joining process, friction welding is well suited for joining materials with very different thermal and mechanical properties, such as metals to ceramics. The objective of this thesis was to evaluate friction joints between dissimilar metals as well as between metals and ceramics. This study started with a look at the effects of different process parameters on the properties of copper to steel (Cu-St) and aluminum to steel (Al-St) friction joints before moving on to aluminum to alumina (Al-Al₂O₃) friction joints. Friction joints were prepared using different forging pressures and rotational speeds. Rotational speeds used were 900 rpm, 1250 rpm and 1800 rpm, while forging pressures were varied from 50 MPa to 110 MPa, depending on the combination of materials to be joined. The joints were evaluated using a combination of strength tests, microstructural examinations and microhardness traverses. Within the range of parameters studied, Cu-St joints showed increasing tensile strength with increasing rotational speed. Forging pressure did not have a significant effect upon the tensile strength. The tensile strengths of the Cu-St joints were lower than either of the parent materials and this might be

attributed to incomplete bonding. Speed of rotation and forging pressure did not have a significant effect upon the tensile strength of the Al-St joints. The Al-St joints had lower tensile strengths than either of the parent materials and this might be due to detrimental intermetallic formation or softening of the material near the joint because of heat. No instances of incomplete bonding were observed in the Al-St joints prepared. The flexural strength of the Al-Al₂O₃ joints increased with increasing speed of rotation. Fracture occurred through the Al₂O₃. However, the flexural strength of the joints was lower than that of the parent Al₂O₃. Incomplete bonding at the edges of the joint might have an effect upon the flexural strength of the joint. Hardness tests were inconclusive due to the large scatter in the results. The metal to ceramic joints possessed properties very different from the dissimilar metal joints.

Bab 1

Pengenalan

1.1 Sambungan seramik kepada logam dan proses kimpalan geseran

Penyambungan seramik kepada logam membolehkan ciri-ciri baik seramik, seperti rintangan haus, kekuatan suhu tinggi, dan rintangan kimia, digabungkan dengan sifat-sifat logam yang dikehendaki, contohnya kemuluran, kebolehmesinan dan keliatan, sekaligus mengurangkan keperluan pemesinan mahal komponen diperbuat seramik sepenuhnya. Sambungan seramik kepada logam yang baik penting dalam aplikasi struktur, seperti dalam enjin turbin, serta dalam aplikasi suhu tinggi, contohnya penderia dalam logam lebur. Di sini kekuatan struktur keseluruhannya seringkali bergantung kepada kualiti penyambungan. Sambungan seramik kepada logam, dalam mengurangkan keperluan pemesinan yang ekstensif atau fabrikasi yang susah, dapat menolong jurutera rekabentuk menggunakan kelebihan komponen seramik dalam rekabentuk tanpa mengorbankan sifat logam yang dikehendaki.

Sambungan seramik kepada logam tidak mudah dilakukan kerana kebanyakan leburan logam kejuruteraan tidak membasahi permukaan seramik. Akibatnya susah untuk menghasilkan sentuhan rapat antara seramik-logam yang disambung. Justeru, hampir kesemua proses penyambungan konvensional yang melibatkan pelakuran bendakerja tidak dapat digunakan. Proses penyambungan seramik kepada logam dianggap perlu, walaupun wujudnya masalah-masalah utama seperti menghasilkan sentuhan rapat antara permukaan-permukaan bersambung. Walaupun proses-proses yang telah dibangunkan dan sedang dikaji, seperti pateri keras, penyambungan resapan,

dan penyambungan fasa cecair fana (*transient liquid phase bonding*), mempunyai pendekatan berbeza terhadap penyelesaian masalah ini, kesemua proses ini perlu

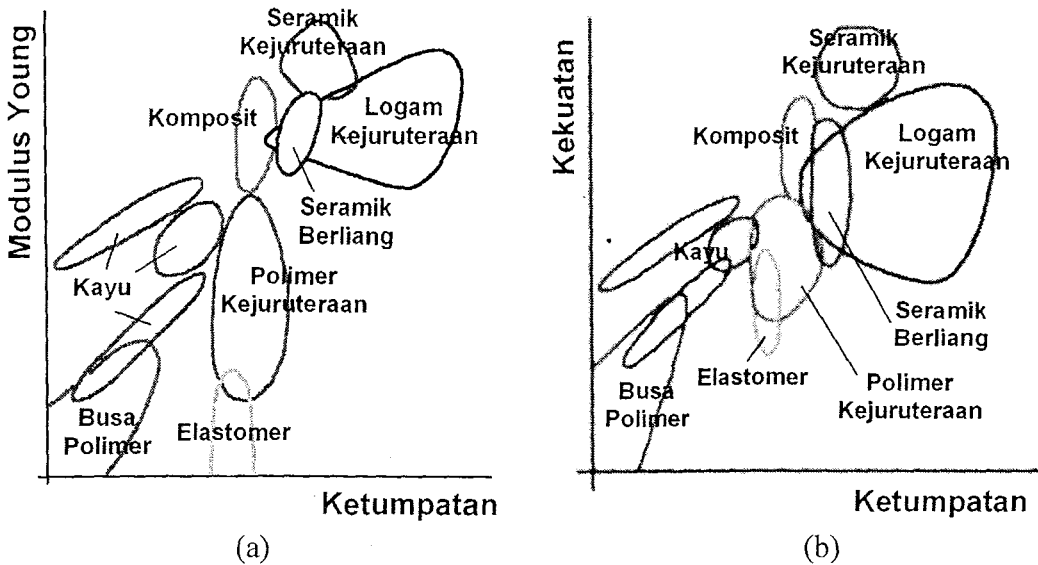
- (i) menghasilkan sentuhan rapat antara permukaan, dan
- (ii) mengambil kira tegasan baki yang terhasil dalam sambungan.

Proses kimpalan geseran berpotensi sebagai proses penyambungan seramik kepada logam kerana berlakunya ubahbentuk ketika menghasilkan sentuhan rapat antara permukaan bersentuh dan suhu rendah proses yang dapat mengurangkan kesan perbezaan sifat-sifat bahan-bahan yang disambung. Penggunaan proses kimpalan geseran yang terhad berbanding proses-proses lain mungkin disebabkan kurangnya kajian dalam kimpalan geseran sebagai proses penyambungan seramik kepada logam. Kimpalan geseran dapat diterima sebagai proses alternatif yang berkesan untuk menyambung seramik kepada logam sekiranya proses ini benar-benar difahami dan dioptimumkan melalui ujian-ujian yang perlu, maka terdapat peluang untuk menghasilkan sambungan yang setanding atau lebih kuat daripada proses-proses sedia ada secara konsisten.

1.1.1 Kepentingan sambungan seramik kepada logam

Seramik digunakan dalam bidang-bidang kejuruteraan aeroangkasa, mekanikal, automotif, penjana kuasa, cari gali minyak, pertahanan dan nuklear (Liang dan Dutta, 2001). Alasan utama kerana seramik mempunyai sifat-sifat fizikal dan mekanikal, seperti kekuatan suhu tinggi, rintangan kakisan dan rintangan haus, yang lebih baik berbanding kebanyakan logam. Rajah 1.1 menunjukkan perbandingan sifat ketegaran dan kekuatan bahan seramik kejuruteraan berbanding bahan kejuruteraan lain.

Walaupun begitu, disebabkan faktor-faktor seperti kos dan kesukaran dalam pemesinan, bahan seramik hanya digunakan secara meluas setelah perkembangan teknologi yang berjaya mengatasi rintangan-rintangan kepada penggunaannya diperolehi. Untuk jurutera rekabentuk, proses penyambungan seramik kepada logam memudahkan integrasi seramik ke dalam rekabentuk tanpa pemesinan atau fabrikasi ekstensif.



Rajah 1.1: Perbandingan (a) ketegaran dan (b) kekuatan seramik kejuruteraan dengan bahan kejuruteraan yang lain (Ashby, 1996)

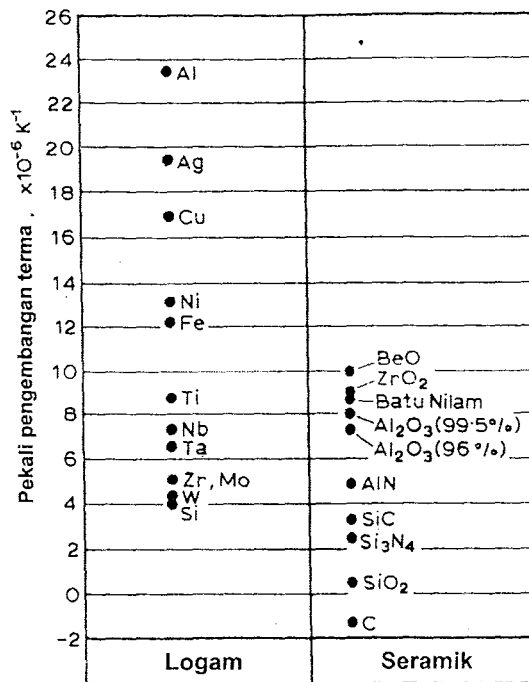
1.1.2 Proses-proses penyambungan seramik kepada logam

Sambungan seramik kepada logam tidak mudah kerana:

- (i) *kebanyakan logam lebur tidak membasahi permukaan seramik* – Dalam ujian *sessile drop*, perlakuan titisan logam lebur di atas substrat seramik diperhatikan untuk menilai sudut membasah (*wetting angle*), θ , dan tenaga antaramuka, γ . Contohnya, logam lebur seperti aluminium tidak membasahi substrat seramik (Howe, 1993).

(ii) *perbezaan sifat-sifat fizikal* – Pekali pengembangan terma (CTE) yang lebih rendah untuk bahan seramik berbanding logam mungkin mengakibatkan tegasan baki pada sambungan setelah penyejukan ke suhu bilik dari suhu proses. Rajah 1.2 menunjukkan perbandingan CTE beberapa bahan seramik berbanding beberapa jenis logam.

(iii) *perbezaan sifat-sifat mekanikal* – Ketegaran berbeza antara bahan seramik dengan logam mempengaruhi taburan tegasan baki dalam sambungan kerana untuk suatu nilai terikan yang sama dalam bahan berbeza akan menghasilkan tegasan yang berbeza.



Rajah 1.2: Perbandingan CTE di antara beberapa seramik terpilih dengan logam (Howe, 1993). Kebanyakan logam mempunyai CTE yang berbeza daripada seramik.

Terdapat pelbagai kaedah penyambungan seramik kepada logam, seperti pemanasan antaramuka terpilih, penyambungan fasa cecair fana, kaedah pateri keras, dan penggunaan kaca tahan panas (Loehman, 1999). Kesemua kaedah tersebut perlu

mengatasi masalah untuk mendapatkan sentuhan rapat antara permukaan serta tegasan baki yang wujud.

Untuk mendapatkan sentuhan rapat permukaan-permukaan bersambung, proses pelogaman yakni bahan seramik disalut dengan lapisan nipis logam terlebih dahulu, sebelum pateri keras digunakan untuk menyambung bendakerja tersebut. Kehadiran unsur aktif seperti Ti atau Cr dalam pateri keras aktif dapat menolong pembasahan permukaan seramik dan seterusnya langkah pelogaman dapat dielakkan (Mizuhara, 1984). Dalam penyambungan resapan, kemas permukaan halus penting supaya sentuhan rapat terhasil, namun ubahbentuk superplastik semasa penyambungan resapan juga dapat menghasilkan sentuhan rapat (Lesuer *et al.*, 1996).

Kesan tegasan baki dapat dikurangkan melalui rekabentuk sambungan seperti dalam sambungan kaca kepada logam *Housekeeper* (Nicholas, 1990) atau dengan rekabentuk sambungan yang lain (Makino *et al.*, 1992). Pemilihan bahan-bahan sambungan dengan sifat-sifat fizikal dan mekanikal yang hampir sama, walaupun dapat mengurangkan kesan tegasan baki, tetapi akan menghadkan kombinasi bahan-bahan sambungan. Sebagai contoh, dua bahan kejuruteraan yang digunakan secara meluas ialah aluminium dan tembaga, mempunyai pengembangan terma yang lebih tinggi daripada seramik (lihat Rajah 1.2). Kajian telah dilakukan terhadap pengurangan suhu proses penyambungan, seperti dalam penghasilan pateri keras dengan takat lebur rendah (Lowder *et al.*, 1996; Nakahashi *et al.*, 1990; Taniguchi, 2000; Taniguchi dan Suzuki, 1999), didapati dapat dikurangkan kesan tegasan baki dengan mengurangkan julat suhu yang dilalui spesimen semasa proses penyambungan.

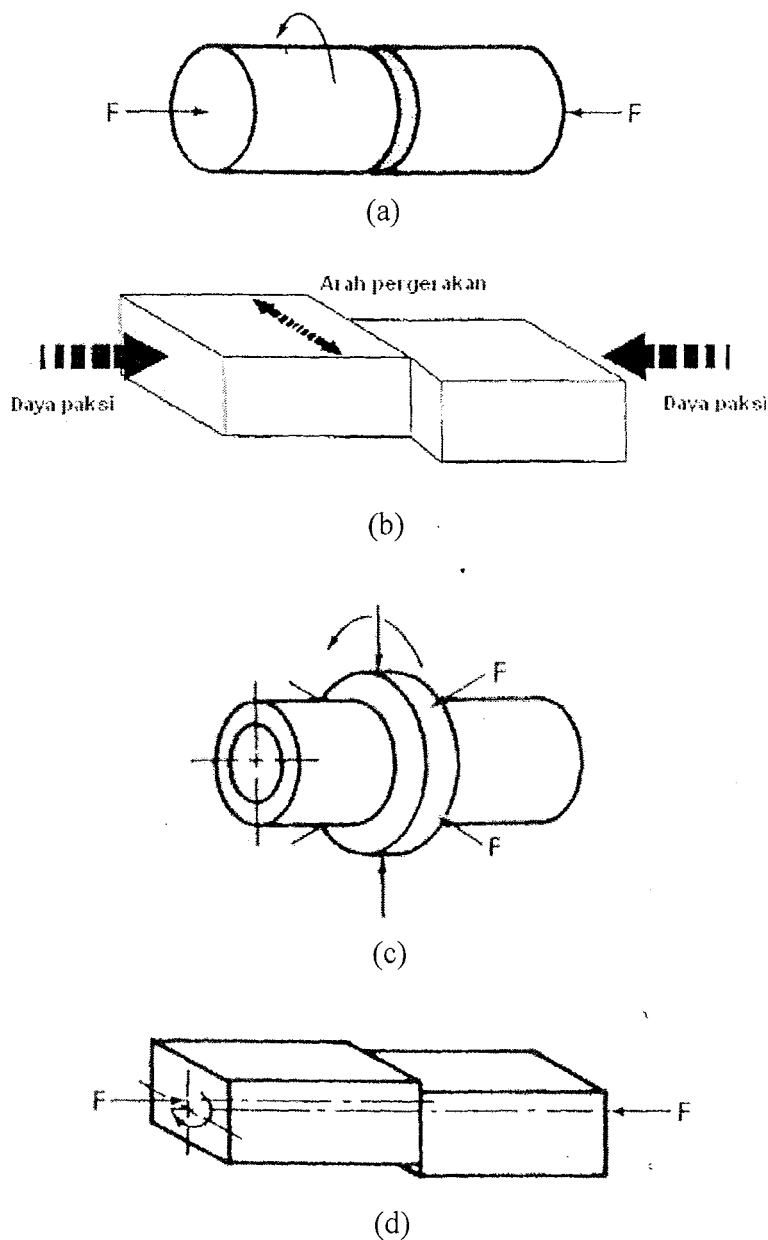
1.1.3 Kimpalan geseran

Proses kimpalan geseran merupakan proses penyambungan keadaan pepejal yang melibatkan suatu bendakerja pertama digerakkan relatif kepada satu bendakerja kedua untuk menjana haba geseran dan ditekan pada bendakerja kedua tersebut sehinggalah suatu sambungan terbentuk. Proses kimpalan geseran dikelaskan sebagai proses sambungan keadaan pepejal kerana suhu proses di bawah takat lebur logam (Wallace *et al.*, 1983) dan ubahbentuk digunakan untuk mendapatkan sentuhan rapat antara permukaan-permukaan bersambung (Schwartz, 1969).

Dalam proses kimpalan geseran jenis putaran, bendakerja berpusing dipaksa pada bendakerja tidak berpusing sehingga sambungan terbentuk. Selain kimpalan geseran jenis putaran, beberapa variasi proses kimpalan geseran, seperti jenis inersia, lurus (*linear*), jejarian (*radial*), dan orbital, dibangunkan untuk memenuhi keperluan industri. Variasi-variasi ini, walaupun berbeza dari segi pergerakan relatif bendakerja (sila rujuk Rajah 1.3), masih menggunakan geseran untuk membentuk sambungan. Kecenderungan terkini menunjukkan bahawa kimpalan geseran jenis adukan yang menggunakan mata alat berpusing untuk membuat sambungan antara plat menjadi tumpuan beberapa penyelidikan (Ericsson dan Sandstrom, 2001; Sato *et al.*, 2002). Walaupun begitu, tumpuan cuma diberi terhadap kimpalan geseran jenis putaran pacuan terus kerana variasi ini digunakan dalam kajian ini.

Kewujudan pelbagai variasi menunjukkan bahawa proses kimpalan geseran ialah suatu proses fleksibel yang dapat memenuhi pelbagai keperluan industri. Memandangkan kimpalan geseran merupakan proses keadaan pepejal yang menggunakan ubahbentuk plastik untuk mendapatkan sentuhan rapat antara permukaan,

potensi proses ini sebagai suatu proses penyambungan seramik kepada logam dianggap mustahak.



Rajah 1.3: (a) Kimpalan geseran jenis inersia atau pacuan terus, (b) kimpalan geseran jenis linear, (c) kimpalan geseran jenis jejarian dan (d) kimpalan geseran jenis orbital.

1.1.4 Kepentingan pengoptimuman parameter proses untuk kimpalan geseran

Dalam kimpalan geseran, parameter proses seperti jenis bahan, tekanan, kelajuan serta tempoh, dikawal supaya sambungan dihasilkan mempunyai kualiti yang konsisten.

Parameter proses berlainan mempunyai kesan berlainan, contohnya:

- (i) *jenis bahan* – Sifat mekanikal sambungan mungkin dipengaruhi sifat fizikal bahan, contohnya perbezaan taburan suhu dan keluasan kawasan terkesan haba mungkin disebabkan perbezaan dalam kekonduksian terma bahan-bahan berlainan. Sambungan tembaga menghasilkan taburan suhu berbeza berbanding sambungan keluli mungkin kerana kekonduksian terma yang berbeza di antara kedua-dua bahan tersebut (Yilbas *et al.*, 1995b). Sifat mekanikal seperti tegasan alah menentukan jumlah ubahbentuk plastik yang berlaku, terutamanya semasa menyambung bahan-bahan berbeza.
- (ii) *kelajuan putaran* – Kelajuan terlalu tinggi menjana haba yang terlalu tinggi dan seterusnya menyebabkan keluasan kawasan terkesan haba bertambah, manakala, kelajuan terlalu rendah tidak dapat menjana haba yang cukup untuk ubahbentuk plastik yang dapat menghasilkan sentuhan permukaan rapat.
- (iii) *tekanan dikenakan* – Walaupun penggunaan tekanan geseran yang tinggi mungkin menjana haba yang cukup untuk sambungan dan tekanan tempaan tinggi mungkin memperbaiki kekuatan lesu sambungan, tetapi tekanan geseran terlalu tinggi mungkin menyebabkan pemendekkan paksi keterlaluan manakala tekanan mampatan yang terlalu tinggi boleh membawa kepada ubahbentuk plastik yang tidak dikehendaki dalam bahan induk.

Sebelum kimpalan geseran dapat diterima sebagai proses alternatif untuk penyambungan seramik kepada logam, pengoptimuman proses adalah perlu supaya sambungan berkualiti dapat dihasilkan secara konsisten.

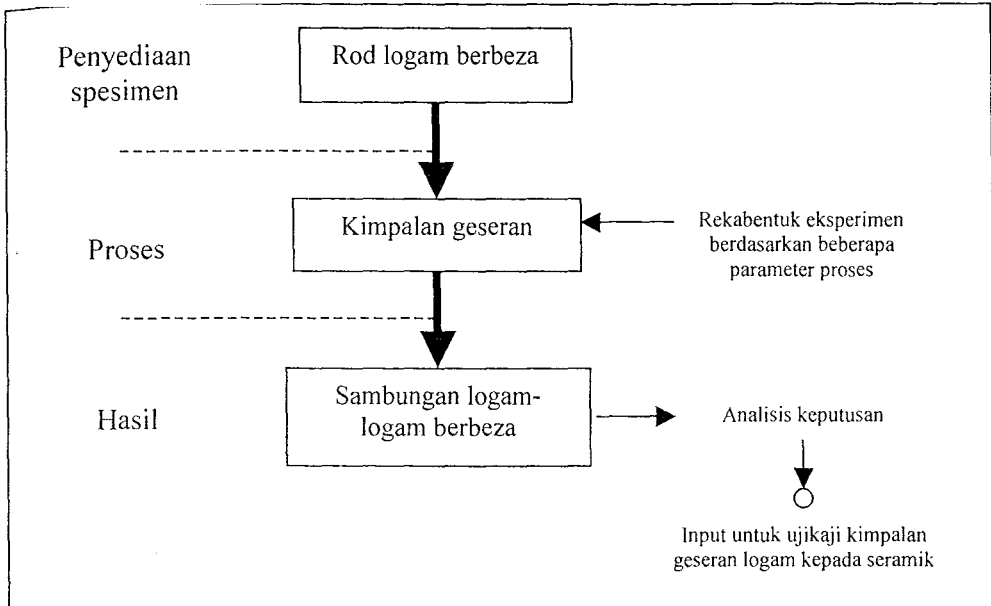
1.2 Objektif penyelidikan

Kimpalan geseran dapat diterima sebagai proses alternatif yang berkesan untuk menyambung seramik kepada logam jika proses itu difahami dan dioptimumkan melalui ujian-ujian tertentu agar dapat menghasilkan sambungan yang setanding atau lebih kuat daripada proses-proses sedia ada secara konsisten. Sehubungan dengan ini, objektif penyelidikan ialah untuk melihat kesan perubahan parameter-parameter proses terhadap sifat-sifat mekanikal dan fizikal sambungan-sambungan yang disediakan melalui kimpalan geseran .

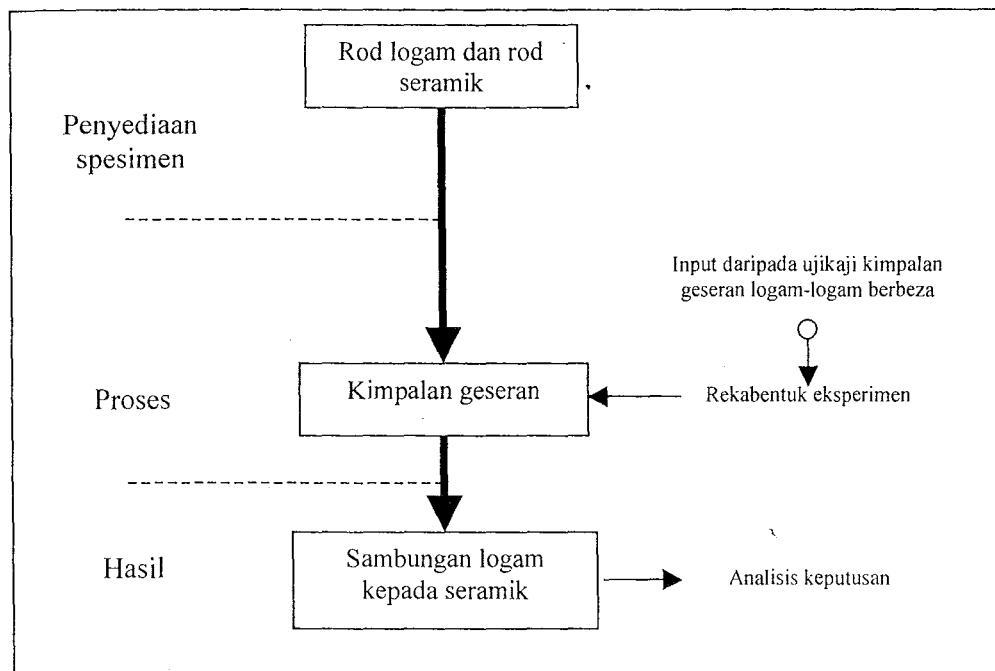
1.2.1 Peringkat-peringkat utama penyelidikan

Terdapat dua peringkat utama dalam penyelidikan ini. **Peringkat pertama** berkaitan kimpalan geseran logam-logam berlainan manakala **peringkat kedua** melibatkan kimpalan geseran seramik kepada logam. Kimpalan geseran logam kepada logam lebih banyak dikaji dan lebih mantap berbanding kimpalan geseran seramik kepada logam. Kajian terhadap penyambungan logam-logam berbeza dapat memberi pengalaman dan pengetahuan am tentang proses kimpalan geseran. Di samping itu, keputusan daripada ujikaji kimpalan geseran logam-logam berbeza dapat memberi petunjuk tentang parameter proses yang paling banyak memberi kesan terhadap kualiti kimpalan geseran.

Kedua-dua peringkat kajian mempunyai bahagian-bahagian yang hampir sama. Ujikaji dimulakan dengan penyediaan spesimen. Spesimen-spesimen ini kemudian disambung secara kimpalan geseran dan analisis dilakukan terhadap sambungan-sambungan yang terhasil supaya kesan perubahan parameter proses terhadap kualiti kimpalan geseran dapat dinilai.



(a)



(b)

Rajah 1.4: Carta alir menunjukkan peringkat-peringkat utama dalam (a) ujikaji kimpalan geseran logam-logam berbeza dan (b) ujikaji kimpalan geseran logam kepada seramik.

Sambungan logam-logam daripada bahan logam yang sama tidak dilakukan kerana sambungan logam-logam berbeza lebih menyerupai kimpalan seramik kepada logam. Di sini sifat mekanikal dan fizikal bahan-bahan yang disambung jauh berbeza. Tambahan pula, dalam sambungan logam-logam berbeza, sebahagian besar ubahbentuk berlaku

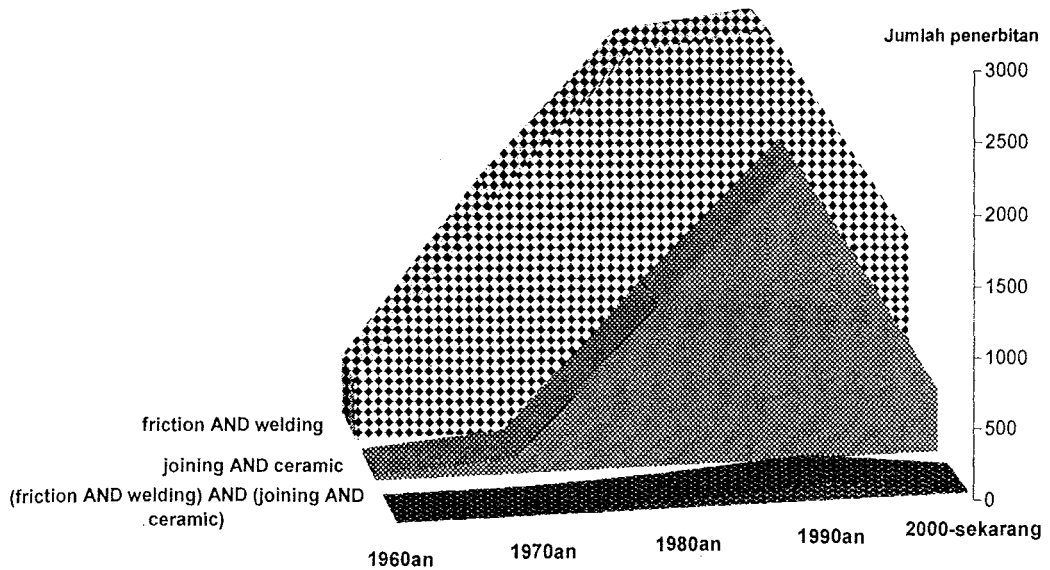
pada bendakerja yang mulur, yaitu keadaan yang hampir sama berlaku pada sambungan seramik kepada logam.

Kajian Persuratan

2.1 Pengenalan

Kajian tentang kimpalan geseran dan penyambungan seramik kepada logam bertambah dari dekad ke dekad. Pangkalan data seperti *ScienceDirect*, *Cambridge Scientific Abstracts* dan *ISI Web of Science* menyediakan kemudahan untuk mengakses abstrak, kertas penuh, artikel jurnal, majalah, paten serta lain-lain penerbitan dengan mudah. Carian istilah "*friction AND welding*" dan "*joining AND ceramic*" melalui pengkalan data abstrak *ScienceDirect* (diperoleh 6 Jun 2003 dari World Wide Web <http://www.sciencedirect.com>), *Cambridge Scientific Abstracts* (diperoleh 6 Jun 2003 dari World Wide Web <http://www.csa.com>) dan *ISI Web of Science* (diperoleh 6 Jun 2003 dari World Wide Web <http://isiknowledge.com>) memberi gambaran kasar tentang jumlah penerbitan dalam bidang-bidang ini. Selain perkembangan dalam bidang ini, pertambahan ini mungkin disebabkan perkembangan teknologi penyokong, pembaikan sistem penyimpanan rekod ataupun keadaan sosio ekonomi pada masa itu. Walaupun ketepatan carian ini dijejaskan oleh kesilapan masukan, seperti kesilapan mukasurat, nama pengarang dan sebagainya, yang memerlukan penghapusan masukan insani, tetapi hasil carian ini sekurang-kurangnya dapat menggambarkan arah alir perkembangan dalam penyambungan seramik kepada logam serta kimpalan geseran.

Hasil carian menggunakan pengkalan data yang tersebut di atas, rumusnya ditunjukkan dalam Rajah 2.1.



Rajah 2.1 Jumlah penerbitan dalam kimpalan geseran dan penyambungan seramik.

Lebih banyak kajian dijalankan mengenai kimpalan geseran berbanding penyambungan seramik kepada logam (Rajah 2.1). Perbezaan ini mungkin kerana kimpalan geseran merupakan proses penyambungan yang dapat menyambung pelbagai jenis bahan kejuruteraan, sedangkan penggunaan seramik dalam aplikasi kejuruteraan masih baru jika dibandingkan dengan logam. Walaupun begitu, jumlah kajian terhadap penyambungan seramik kepada logam semakin bertambah. Bilangan kajian yang rendah dalam penggunaan proses kimpalan geseran untuk menyambung seramik kepada logam menunjukkan perlunya lebih banyak kajian dalam bidang ini.

2.2 Sejarah awal penyelidikan tentang kimpalan geseran dan penyambungan seramik kepada logam

Perbincangan ini dibahagikan kepada dua bahagian:

- (i) *kimpalan geseran logam kepada logam*
- (ii) *kimpalan geseran seramik kepada logam*

Sejarah awal penyelidikan ini penting kerana pemahaman terkini adalah didasarkan penemuan penyelidik sebelum ini. Tumpuan penyelidik yang berubah dari masa ke

masa, dibina atas perkembangan dan penemuan penyelidikan sebelumnya. Perbincangan dalam bahagian ini bertujuan melihat perkembangan kajian dari dekad ke dekad serta arah tuju kajian pada masa akan datang

2.2.1 Kajian awal tentang kimpalan geseran

Kimpalan geseran bukan proses baru. Menurut Niterl (Lison, 1988; Niterl, 1969), paten pertama tentang kimpalan geseran dikemukakan pada 1891, tetapi aplikasi industri yang meluas hanya bermula selepas 1957 setelah Chudikov mengemukakan hasil penyelidikannya.

(a) Dekad 1960an

Penyelidikan pada dekad ini banyak berkisar kepada aplikasi praktikal kimpalan geseran. Penyelidik menumpukan perhatian terhadap penghasilan dan penambahbaikan sistem kimpalan geseran (Hasui *et al.*, 1969; Kaminsky, 1966; Kershenbaum Ya *et al.*, 1968) untuk penggunaan pelbagai sektor seperti automotif (Hamazaki, 1965; Rusakov dan Gulyaev, 1967), aeroangkasa (Gripshover *et al.*, 1968), serta carigali (Mekhtiev dan Krepkov, 1965). Kajian juga banyak dijalankan terhadap kimpalan geseran logam-logam berbeza terutamanya tembaga dan aloi aluminium (Ando, 1966; Hazlett, 1962). Variasi proses kimpalan geseran iaitu kimpalan geseran inersia turut dikaji pada masa ini (Calton *et al.*, 1967).

Walaupun begitu, kajian yang bertujuan memahami mekanisme proses kurang daripada kajian yang menumpu terhadap aplikasi khusus. Penyelidik mengkaji kesan perubahan parameter proses terhadap sambungan yang dihasilkan (Nakamura *et al.*, 1969) dan cuma segelintir penyelidik yang cuba memodelkan keadaan semasa proses (Cheng, 1963; Shternin, 1966; Sluzalec, 1966).

(b) Dekad 1970an

Kajian pada dekad 1970an masih bertumpu kepada aplikasi praktikal kimpalan geseran dalam industri (Danil'Chik dan Chul, 1974; Gordon, 1971; Lakatos dan Minarik, 1976; Varga, 1970; Voinov, 1972). Beberapa variasi proses kimpalan geseran (Nicholas dan Lilly, 1978) khususnya kimpalan geseran jenis inersia turut dikaji (Hughes dan Hayman, 1976). Kimpalan geseran bawah permukaan laut (Tasaki *et al.*, 1976) mungkin digunakan untuk penyelenggaraan dan pemasangan paip (Lochridge, 1978).

Walaupun bertambah dari dekad sebelumnya, jumlah kajian tentang pengoptimuman parameter proses (Dobrovidov, 1975; Ellis dan Nicholas, 1975; Nakamura *et al.*, 1970; Schaefer, 1972; Yu, 1971), pemodelan fenomena fizikal (Adam, 1979; Seregin dan Sabantsev, 1977) serta mekanisme proses (Duffin dan Bahrani, 1976; Kreye dan Wittkamp, 1977) masih kurang jika dibandingkan dengan aplikasi industri.

(c) Dekad 1980an

Kajian dalam dekad ini berbeza daripada dekad-dekad sebelumnya kerana banyak kajian ditumpukan terhadap pengoptimuman parameter proses (Basile *et al.*, 1984; Drews dan Meyer, 1980; Murti dan Sundaresan, 1983). Kajian juga diteruskan ke atas penyambungan bahan-bahan yang sukar disambung seperti besi tuang (Engels, 1980; Richter dan Palzkill, 1986), keluli mudah mesin (*free machining steels*) (Hasui dan Wakida, 1980; Robot *et al.*, 1986) serta kombinasi logam-logam berlainan (Kato dan Tokisue, 1986; Mechşner dan Klock, 1983). Beberapa penyelidik juga mencadangkan mekanisme yang mungkin terlibat semasa kimpalan geseran (Adam, 1980; Kyusojin *et al.*, 1980). Banyak juga kajian yang memanfaatkan kawalan komputer untuk

memperbaiki hasil kimpalan geseran, sama ada melalui pemodelan proses (Na *et al.*, 1984) ataupun pengawalan parameter proses yang lebih tepat (Pearson, 1987). Penggunaan kimpalan geseran dalam industri-industri khusus seperti automotif (Fukaya, 1985; Okuyama, 1985), cari gali minyak (Hirakawa *et al.*, 1982), elektronik dan sebagainya masih dijalankan. Beberapa variasi proses kimpalan geseran telah dikaji termasuk kimpalan geseran bawah permukaan laut (Nicholas, 1983), kimpalan geseran mikro (Rodwell, 1985), jenis orbital (Craine dan Francis, 1987), jenis linear (Nicholas, 1987) serta penyalutan permukaan (*friction surfacing*) menggunakan bendakerja guna habis (Bedford dan Richards, 1985).

2.2.2 Kimpalan geseran seramik kepada logam (dekad selepas 90an)

Kimpalan geseran seramik kepada logam kurang dikaji berbanding kimpalan geseran logam kepada logam. Beberapa kertas semakan (Essa dan Bahrani, 1990; Fernie, 1994; Fukuzawa dan Kojima, 1991; Galan dan Gudrian, 1970) dan buku teks (Schwartz, 1969; Wallace *et al.*, 1983) menyenaraikan penyambungan seramik kepada logam sebagai satu daripada aplikasi kimpalan geseran tetapi kajian tidak banyak dilakukan dalam bidang ini. Terdapat paten untuk proses menghasilkan pemegang elektrod untuk penurunan logam lebur (Byrne *et al.*, 1984) serta bahagian automotif (Suzuki dan Ohi, 1990). Kajian awal banyak menumpu terhadap penggunaan aluminium, dalam pelbagai konfigurasi seperti paip, lapisan antaramuka dan sebagainya, untuk penyambungan kepada seramik (Grunauer *et al.*, 1988; Kanayama *et al.*, 1985; Suzumura *et al.*, 1987) terutamanya seramik jenis oksida seperti alumina (Essa dan Bahrani, 1989; Horn, 1989). Walaupun begitu, kajian turut dijalankan atas penyambungan seramik dengan logam lain seperti keluli tahan karat (Omori dan Sano, 1987) dan aloi tembaga (Nishimoto *et al.*, 1999a). Disebabkan jumlah kajian yang

banyak tentang kimpalan geseran aluminium kepada seramik, logam lain seperti keluli
cuba disambung menggunakan lapisan nipis aluminium atau logam aktif yang lain
sebagai lapisan antaramuka (Horn dan Grunauer, 1991; Ikeuchi *et al.*, 1991; Nishimoto
et al., 2000; Suzuki *et al.*, 1991; Suzumura *et al.*, 1988)

Beberapa penyelidik telah mencadangkan mekanisme penyambungan seramik
kepada logam melalui kimpalan geseran terutamanya sambungan Al-Al₂O₃ (Essa dan
Bahrani, 1990; Larikov *et al.*, 1990). Kajian juga dibuat mengenai kesan perubahan
parameter proses (Ikeuchi *et al.*, 1991) serta pembolehubah yang lain seperti jenis
(Aritoshi *et al.*, 1994) atau tebal lapisan antaramuka.

2.3 Pemahaman tentang kimpalan geseran dan penggunaannya untuk menyambung seramik kepada logam

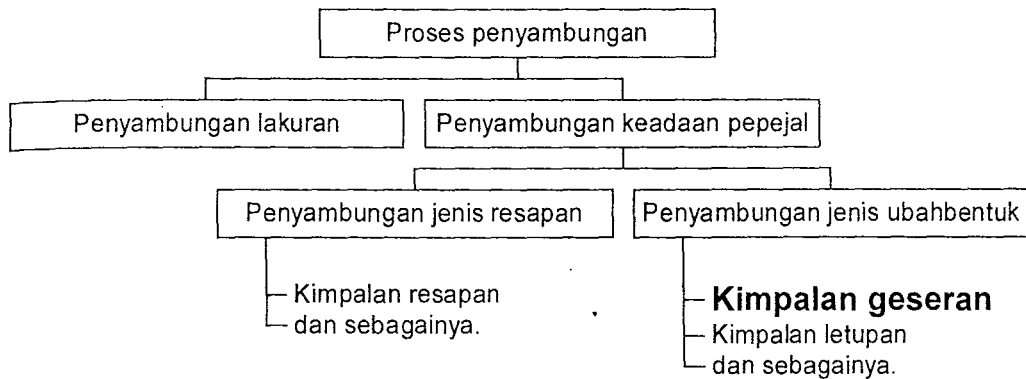
Perbincangan dibahagikan kepada dua bahagian:

- (i) *kimpalan geseran logam kepada logam* - Tumpuan diberikan terhadap proses kimpalan geseran, mekanisme pembentukan sambungan logam kepada logam, parameter-parameter proses yang utama, serta sifat-sifat sambungan yang dihasilkan.
- (ii) *kimpalan geseran seramik kepada logam* - Tumpuan diberi terhadap perbezaan di antara sambungan seramik kepada logam dengan logam kepada logam dari segi mekanisme penyambungan, parameter proses penting, serta sifat-sifat sambungan yang diperoleh.

2.3.1 Kimpalan geseran logam kepada logam

Kimpalan geseran tergolong sebagai satu proses penyambungan keadaan pepejal (Rajah 2.2) dan mempunyai mekanisme penyambungan yang jauh berbeza daripada

proses penyambungan lakuran. Sebagai suatu proses pembuatan, adalah penting dari segi praktik untuk mendapatkan parameter proses yang sesuai dengan mekanisme-mekanisme penyambungan yang penting. Sifat-sifat sambungan yang disediakan juga penting kerana proses penyambungan mungkin mengubah sifat bahan daripada bahan asal.



Rajah 2.2: Beberapa jenis proses penyambungan (Schwartz, 1969)

2.3.1(a) Mekanisme penyambungan untuk sambungan logam kepada logam

Memandangkan kimpalan geseran ialah proses keadaan pepejal yang tidak sama dengan proses kimpalan lakuran (*fusion welding processes*) konvensional, mekanisme penyambungan proses ini agak berbeza daripada proses kimpalan yang biasa. Walaupun terdapat beberapa penyelidik yang berpendapat proses pelakuran memainkan peranan semasa penyambungan (Kochergin, 1983; Tensi *et al.*, 1982), tetapi kebanyakan penyelidik percaya bahawa proses keadaan pepejal penting dalam kimpalan geseran (Bethlehem, 1984; Kyusojin *et al.*, 1980). Secara amnya terdapat dua peringkat dalam proses penyambungan keadaan pepejal (Schwartz, 1969):

- (i) *ubahbentuk plastik* - Ubahbentuk plastik menyediakan sentuhan rapat antara permukaan bersambung.

- (ii) *resapan* - resapan berlaku antara bendakerja bersambung. Bergantung kepada bahan yang disambung serta parameter proses yang digunakan, pertumbuhan ira boleh melenyapkan garis sambungan dan menghasilkan bendakerja monolitik. Walaupun begitu, penerangan dari segi resapan mungkin lebih tepat berbanding pertumbuhan ira kerana garis sambungan juga tidak diperhatikan apabila menyambung bendakerja amorfus (Kawamura *et al.*, 2003). Resapan mungkin membantu dalam menghasilkan sambungan yang kuat, tetapi pembentukan antaralogam (Fiezhang, 1982; Morozumi *et al.*, 1989; Nielsen dan Bay, 1984) atau eutektik bertakat lebur rendah perlu dielakkan (Kreye, 1982) untuk sesetengah kombinasi unsur, contohnya Ni dalam W (Schwartz, 1969).

Faktor-faktor yang mungkin membantu dalam mencapai sentuhan rapat termasuk :

- (i) *penggunaan bahan dengan tegasan alah rendah* - Ubahbentuk plastik lebih mudah berlaku (Bakshi *et al.*, 1982; Lison dan Bachner, 1987).
- (ii) *pengerjaan sejuk* - Kerja sejuk yang meninggalkan kesan tegasan dan terikan baki mungkin membantu dalam mencapai sentuhan rapat kerana penghabluran semula pada permukaan bersentuh dapat meningkatkan kemuluran lalu membantu ubahbentuk plastik (Lebedev *et al.*, 1989; Masumoto dan Hira, 1979). Walaupun begitu, penghabluran semula adalah sukar dikesan kerana biasanya terhad kepada kawasan berhampiran antaramuka sambungan sahaja (Schwartz, 1969).
- (iii) *kemasan permukaan yang baik* - Permukaan yang kasar mungkin menyukarkan sentuhan rapat sekiranya suhu proses tidak cukup untuk menggalakkan penghabluran semula dan/atau ubahbentuk plastik (Futamata dan Fuji, 1989; Schwartz, 1969). Kekuatan sambungan dipengaruhi oleh

kemasan permukaan (Richards dan Bedford, 1980; Workman dan Nicholas, 1986).

Kehadiran unsur-unsur seperti Pd, Ni dan Pt sebagai lapisan nipis (Sassani dan Neelam, 1988) mungkin menggalakkan pembentukan sempadan butiran antara permukaan bersentuh. Unsur dengan saiz atom kecil seperti Be mungkin membantu dalam resapan ke dalam logam bersambung.

Walaupun begitu, kimpalan geseran mempunyai sedikit perbezaan dengan proses penyambungan keadaan pepejal seperti penyambungan resapan. Dalam kimpalan geseran, dipercayai bahawa peringkat mendapatkan sentuhan rapat lebih penting berbanding peringkat resapan (Schwartz, 1969). Secara amnya, dipercayai bahawa kemasan permukaan tidak begitu penting dalam proses kimpalan geseran berbanding proses penyambungan resapan (Schwartz, 1969). Dalam penyambungan resapan, ubahbentuk setempat permukaan mungkin berlaku melalui proses rayapan yang bergantung kepada suhu dan masa. Proses ubahbentuk yang ekstensif semasa kimpalan geseran dapat membantu dalam mencapai sentuhan rapat permukaan yang diperlukan. Bergantung kepada parameter proses, sambungan yang kuat mungkin diperoleh dengan sedikit resapan (Schwartz, 1969).

Terdapat tiga halangan utama yang perlu diatasi untuk membentuk sambungan melalui kimpalan geseran (Schwartz, 1969):

- (i) *kotoran permukaan*¹ - Sebarang kotoran atau lapisan nipis yang menghalang sentuhan rapat perlu dipecahkan melalui ubahbentuk plastik (Kolmogorov dan Zalazinsky, 1998).
- (ii) *jurang tenaga* - Jurang tenaga ini dikaitkan dengan penyusunan semula atom-atom untuk membentuk sempadan ira semasa penyambungan. Untuk

memperoleh sambungan yang sekuat bahan induk, jarak antara atom pada antaramuka sambungan perlu sama dengan parameter kekisi bahan yang disambung untuk membentuk sempadan ira yang berkesan. Seseorang penyelidik berpendapat bahawa susunan semula kehelan untuk mendapatkan struktur induk semasa kimpalan geseran hampir sama seperti yang berlaku semasa lakuran (Kochergin, 1983).

- (iii) *terikan elastik* - Pemulihan elastik mungkin menyebabkan kegagalan sambungan. Ubahbentuk plastik perlu mengatasi jumlah pemulihan elastik (Schwartz, 1969).

Terdapat dua peringkat tempoh semasa proses kimpalan geseran (Fuji *et al.*, 1992):

- (i) t_b - Tempoh sambungan iaitu tempoh minimum untuk penyambungan lengkap.
- (ii) t_r - Tempoh santaian selepas penyambungan lengkap. t_r terlalu panjang mungkin menyebabkan pembentukan sebatian antaralogam pada permukaan sambungan.

Mikroliang yang hadir pada antaramuka sambungan berkurang dengan bertambahnya kelajuan putaran (Yilbas *et al.*, 1995b). Oleh itu, pemilihan tempoh sambungan dan kelajuan putaran patut ditetapkan dengan teliti agar penyambungan lengkap diperoleh tanpa pembentukan sebatian antaralogam keterlaluan.

Pembentukan sebatian antaralogam yang mungkin memberi kesan negatif terhadap sambungan dikhuatiri apabila mengimpal kombinasi bahan-bahan tertentu. Walaupun kimpalan geseran merupakan proses penyambungan keadaan pepejal, pembentukan sebatian antaralogam adalah mungkin dalam kombinasi logam-logam tertentu seperti yang diperhatikan beberapa penyelidik (Tsuchiya dan Kawamura, 1996). Dalam kajian

yang dilakukan ke atas penghasilan komponen peralihan mengkonduksi elektrik, Abbasi *et al.* (2001) membandingkan proses kimpalan geseran dengan gelekan sejuk. Beberapa sebatian antaralogam, seperti Cu_3Al , Cu_4Al_3 , CuAl , dan CuAl_2 , serta lapisan larutan pepejal tepu aluminium dalam tembaga mungkin terhasil semasa penyambungan logam-logam ini. Pengukuran ketebalan lapisan sebatian antaralogam dilakukan menggunakan ujian kerintangan elektrik. Pertumbuhan lapisan sebatian antaralogam bergantung kepada fungsi linear tempoh seperti ditunjukkan dalam Persamaan 2.1 (Abbasi *et al.*, 2001).

$$X^2 = k \cdot t \quad \text{-----} \quad \text{Persamaan 2.1}$$

di mana X mewakili ketebalan lapisan sebatian antaralogam

k mewakili pemalar kekadaran

t mewakili tempoh pada suhu pembentukan sebatian antaralogam.

Penyelidik berkenaan (Abbasi *et al.*, 2001) berpendapat bahawa pemalar kekadaran untuk proses kimpalan geseran, bernilai $1.6 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$ adalah lebih tinggi daripada pemalar kekadaran untuk proses gelekan sejuk, iaitu $6.3 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$, kerana suhu lebih tinggi dan input haba dalam kimpalan geseran. Penerimaan sesuatu sambungan dapat didasarkan atas ketebalan lapisan antara sebatian kerana terdapat ketebalan genting supaya mod kegagalan bertukar dari patah mulur kepada patah rapuh (Abbasi *et al.*, 2001). Yilbas *et al.* (1995b) mencadangkan kawalan proses dalam kimpalan geseran patut bertujuan menghadkan ketebalan lapisan sebatian antaralogam.

2.3.1(b) Pengoptimuman parameter proses dalam kimpalan geseran

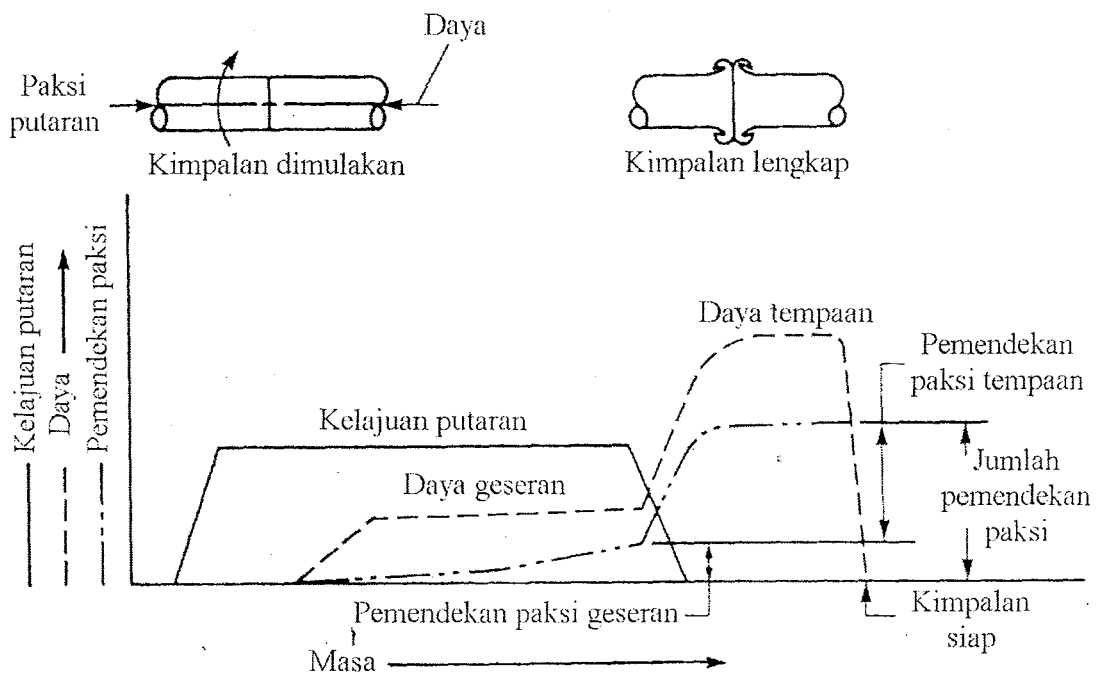
Terdapat dua peringkat dalam proses kimpalan geseran:

- (i) *peringkat geseran* – Haba geseran menaikkan suhu pada antaramuka bendakerja dan memudahkan ubahbentuk plastik kerana tegasan aliran kebanyakan logam kejuruteraan berkurang dengan peningkatan suhu.

Ubahbentuk plastik membantu memecahkan lapisan oksida dan mendedahkan logam belum teroksida untuk sambungan.

- (ii) *peringkat tempaan* – Tekanan dikekalkan atau ditambah semasa peringkat tempaan untuk mengukuhkan sambungan. Bergantung kepada tekanan yang digunakan serta bahan yang disambung, peringkat ini mungkin memperbaiki sifat mekanikal sambungan dengan menempa logam pada kedua-dua belah sambungan (Kang *et al.*, 1996).

Proses parameter yang boleh dikawal dalam kimpalan geseran termasuk tekanan geseran, tekanan tempaan, tempoh geseran dan/atau tempaan, kelajuan putaran, dan jarak pemendekan paksi (Davies, 1984). Rajah 2.3 menunjukkan kedudukan pelbagai parameter proses dalam peringkat-peringkat kimpalan geseran pacuan terus.



Rajah 2.3 Kedudukan proses parameter utama dalam peringkat-peringkat kimpalan geseran pacuan terus (Linnert, 1994).

Peringkat geseran boleh dibahagikan kepada dua peringkat (Kang *et al.*, 1996; North *et al.*, 1997). Semasa peringkat pertama, geseran dan ubahbentuk bergantung pada

peremuan gerutu-gerutu pada permukaan bersentuh. Kelajuan putaran perlu cukup tinggi supaya haba geseran menyamai atau melebihi haba yang hilang ke persekitaran melalui sinaran (Vairis dan Frost, 1999) dan perolakan udara. Semasa peringkat kedua, keadaan mantap tercapai apabila penjanaan haba geseran diimbangi kehilangan haba ke persekitaran dan pengerasan terikan diimbangi pelembutan akibat haba. Pemendekan paksi berlaku pada kadar tinggi jika tekanan dikekalkan atau ditambah pada peringkat ini. Bendasing atau oksida mungkin ditolak keluar bersama lebih logam kimpalan pada peringkat ini (Davies, 1984).

Dalam kimpalan geseran gandingan terus, tempoh berhenti untuk putaran selepas peringkat geseran adalah penting. Menurut panduan dalam *ASM Metals Handbook* (Wallace *et al.*, 1983), tempoh berhenti untuk bendakerja berdiameter kurang daripada $\frac{1}{2}$ inci (12.7 mm) sepatutnya kurang daripada 1.5 saat manakala tempoh berhenti untuk bendakerja berdiameter 3 inci (76.2 mm) sepatutnya antara $\frac{1}{2}$ saat sehingga 2 saat supaya kimpalan tidak terkoyak. Walaupun begitu, dalam kajian mereka, Yilbas *et al.* (1995a) menyatakan bahawa tempoh berhenti yang terlalu cepat menghasilkan kekuatan kimpalan yang lebih rendah kerana anjakan tempaan dikurangkan dan momen berhenti lebih rendah.

Pengoptimuman parameter proses melalui kaedah statistik, seperti kaedah permukaan sambutan (*response surface methods; RSM*), merupakan suatu pendekatan sistematik apabila berhadapan dengan sistem yang baru. Walau bagaimanapun, pendekatan ini biasanya terhad kepada jenis bahan yang disambung atau julat parameter yang dikaji. Kaedah-kaedah statistik seperti ini telah digunakan untuk menilai parameter proses sesuai untuk kimpalan geseran keluli (Dobrovidov, 1975). Kebelakangan ini, terdapat penyelidik yang menggunakan kaedah statistik untuk menilai kesan parameter