

DISERTASI

**KARAKTERISASI KUALITAS PENGELASAN PADA
MATERIAL ALUMINIUM-MAGNESIUM DENGAN PROSES
MICRO FRICTION STIR SPOT WELDING (μ FSSW)**

*Welding Quality Characterization of Aluminum-Magnesium
Material with Micro-Friction Stir Spot Welding (μ FSSW) Process*

**SEMUEL BORON MEMBALA
D043191001**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN DISERTASI

**KARAKTERISASI KUALITAS PENGELASAN PADA
MATERIAL ALUMINIUM-MAGNESIUM DENGAN PROSES
MICRO FRICTION STIR SPOT WELDING (μ FSSW)**

Disertasi

sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor
Program Studi Ilmu Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

**SEMUEL BORON MEMBALA
D043191001**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

DISERTASI

KARAKTERISASI KUALITAS PENGELOASAN PADA
 MATERIAL ALUMINIUM-MAGNESIUM DENGAN PROSES
 PENGELOASAN *MICRO FRICTION STIR SPOT WELDING*
 (μ FSSW)

SEMUEL BORON MEMBALA
 NIM : D043191001

Telah diperiksa dan dinyatakan memenuhi untuk melaksanakan ujian disertasi

Menyetujui
 Promotor

Prof. Dr. Ir. Onny Suryono Sutresman, M.T
 Nip 19570914 198703 1 001

Co-Promotor

Co-Promotor

Dr. H. Hairul Arsyad, ST.,MT
 Nip 19750322 200212 1 001

Dr. Muhammad Syahid, S.T.,M.T
 NIP. 19770707 200511 1 001

Ketua Program Studi,
 S3 Ilmu Teknik Mesin

Dekan Fakultas Teknik
 Universitas Hasanuddin

Dr. Eng. Andi Amriyoyo Mochtar, ST., M.Eng.
 NIP. 19760216 201012 1 002

Prof. Dr. Eng. B. Muhammad Ibrahim Ramli, ST. MT., IPM., ASEAN Eng.
 NIP. 19730926 200012 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, disertasi berjudul “ karakterisasi kualitas pengelasan pada material aluminium-magnesium dengan proses pengelasan *micro friction stir spot welding* (μ FSSW)” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof. DR. Ir. Onny S. Sutresman, M.T sebagai promotor, DR. H. Hairul Arsyad, ST.,MT sebagai ko-promotor-1, dan DR. Muhammad Syahid, ST.,MT sebagai ko-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi apa pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari disertasi ini telah diseminasikan di seminar internasional ISAIM 2022 terindeks scopus dengan judul artikel “ Variation of Micro Friction Stir Spot Welding (μ FSSW) Parameters on Metallography with Similar Materials AA1100” dan di Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, terindeks scopus Q3 dengan judul artikel “ Identifying The Effect of Micro Friction Stir Spot Welding (μ FSSW) Parameters on Weld Geometry, Mechanical Properties, and Metallography on Dissimilar Materials of AZ31B and AA1100”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin,

Gowa, 06 Maret 2023

Yang Menyatakan



SEMUEL BORON MEMBALA
NIM: D043191001

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmatNYA sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.

Penelitian yang saya lakukan dapat terlaksana dengan sukses dan disertasi ini dapat terampungkan atas bimbingan, diskusi dan arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Onny S. Sutresman, M.T sebagai promotor, Dr. H. Hairul Arsyad, S.T., M.T. sebagai ko-promotor-1, dan Dr. Muhammad Syahid, S.T., M.T. sebagai ko-promotor-2,
2. Prof. Dr. Ir. Zulifli Djafar, M.T., Dr. Ir. Ahmad Yusran Aminy, M.T., Dr.Eng Lukmanul Hakim Arma, S.T., M.T., dan Azwar Hayat, S.T., M.Sc., Ph.D sebagai komisi tim penguji.
3. Rektor universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi saya menempuh program doktor serta para dosen dan rekan-rekan dalam tim penelitian.
4. Prof. Dr. Ario Sunar Baskoro, S.T., M.T., M.Eng. yang telah mengizinkan kami untuk penelitian di Lab. Teknologi Manufaktur Universitas Indonesia,
5. Dr. Agus Widyianto, M.T. atas waktu dan kesediaan untuk membantu proses penelitian,
6. CMPFA atas kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan di laboratorium *material* dan metalurgi, dan kepada PT. Cipta Mikro *Material* (CMM) atas dukungan menggunakan fasilitas dan peralatan di laboratorium *material* dan metalurgi.
7. Kepada pimpinan Universitas Cenderawasih saya mengucapkan terima kasih atas bantuan dana yang diberikan selama menempuh program Pendidikan doktor.

Akhirnya, kepada orang tua tercinta saya mengucapkan limpahan terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan, dan motivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada istri tercinta Ibu Matina Tasik, SE., M.Ak dan kedua anak saya Friskila dan Mikhaella serta seluruh keluarga (kakak, adik, ipar, paman, tante dan sepupu) atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.

Penulis,

SEMUEL BORON MEMBALA
NIM: D043191001

ABSTRAK

SEMUEL BORON MEMBALA. Karakterisasi kualitas pengelasan pada *material* aluminium-magnesium dengan proses pengelasan micro friction stir spot welding (μ FSSW) (dibimbing oleh **Onny Suryono Sutresman, Hairul Arsyad, Muhammad Syahid**).

Micro-friction stir spot welding (μ FSSW) merupakan salah satu jenis pengelasan yang cocok untuk penyambungan *material* ringan. Sudah banyak penelitian telah membuktikan bahwa pengelasan ini cocok untuk menyambung bahan yang tipis. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik kualitas pengelasan pada *material* aluminium-magnesium dengan proses pengelasan μ FSSW untuk aplikasi pada kendaraan. Penelitian ini dibagi menjadi empat tahap, yakni: 1) karakterisasi kualitas pengelasan μ FSSW pada *dissimilar material* AA1100-AZ31B; 2) karakterisasi kualitas pengelasan μ FSSW pada *similar material* AA1100; 3) karakterisasi kualitas pengelasan μ FSSW pada *similar material* AZ31B; dan 4) kontrol logika fuzzy untuk memprediksi kualitas las pada micro-friction stir spot welding dengan *similar material* AZ31B. *Material* yang digunakan adalah aluminium seri AA1100 dan magnesium seri AZ31B dengan ketebalan < 1 mm. Analisis hasil kualitas las μ FSSW meliputi geometri las, sifat mekanik (uji tarik dan uji kekerasan mikro), metalografi dan *fracture* (SEM & EDS). Selain itu juga ditambah analisis distribusi temperatur dan gaya aksial selama proses pengelasan μ FSSW. Berdasarkan penelitian ini, kami menemukan bahwa *material* AA1100 dan AZ31B dapat disambung dengan baik menggunakan proses pengelasan μ FSSW untuk *similar material* AA1100, *similar material* AZ31B dan *dissimilar material* AA1100-AZ31B. Pada *similar material* AA1100 ditemukan pembangkitan dislokasi dan terjadi rekristalisasi dinamis pada *material* aluminium. Beban geser maksimum dan beban silang maksimum masing-masing adalah 395 ± 24 N dan 321 ± 35 N dengan *plunge depth* 600 mikron. Kemudian untuk *similar material* AZ31B ditemukan bahwa *dwell time* yang lebih tinggi dan *plunge depth* pahat yang lebih besar menghasilkan lebih banyak panas yang berkontribusi pada rekristalisasi yang lebih besar, sedangkan *plunge depth* pahat yang lebih rendah dan *dwell time* yang lebih rendah menghasilkan lebih sedikit panas sehingga menghasilkan struktur butiran yang lebih halus. Sedangkan pada *dissimilar material* AA1100-AZ31B ditemukan pembentukan IMC pada antarmuka antara sambungan paduan Al dan Mg. IMC ini terungkap sebagai Al_3Mg_2 terbentuk pada substrat Al, dan $Al_{12}Mg_{17}$ terbentuk pada substrat Mg. Beban geser maksimum dan beban silang maksimum masing-masing mencapai 387 ± 17 N dan 29 ± 2 N dengan *dwell time* 700 milidetik.

Kata kunci: micro friction stir spot welding, aluminium, magnesium, kualitas las

ABSTRACT

SEMUEL BORON MEMBALA. Welding quality characterization of aluminum-magnesium material with micro-friction stir spot welding (μ FSSW) process (supervised by Onny Suryono Sutresman, Hairul Arsyad, Muhammad Syahid).S

Micro-friction stir spot welding (μ FSSW) is a type of welding that is suitable for joining light materials. Many studies have proven that this welding is suitable for joining thin materials. This study aims to examine the welding quality characteristics of aluminum-magnesium materials using the μ FSSW welding process for vehicle applications. This research was divided into four stages, namely: 1) characterization of the welding quality of μ FSSW on the dissimilar material AA1100-AZ31B; 2) characterization of the welding quality of μ FSSW on the similar material AA1100; 3) characterization of the welding quality of μ FSSW on the similar material AZ31B; and 4) fuzzy logic control to predict weld quality on micro-friction stir spot welding with similar material AZ31B. The materials used are aluminum AA1100 series and magnesium AZ31B series with a thickness of < 1 mm. Analysis of the results of the μ FSSW weld quality includes weld geometry, mechanical properties (tensile test and microhardness test), metallography and fracture (SEM & EDS). In addition, an analysis of the temperature distribution and axial forces during the μ FSSW welding process is also added. Based on this research, we found that AA1100 and AZ31B materials could be joined properly using the μ FSSW welding process for similar materials AA1100, similar materials AZ31B and dissimilar materials AA1100-AZ31B. In the similar material AA1100, dislocation generation and dynamic recrystallization occur in aluminum material. The maximum shear load and maximum cross load are 395 ± 24 N and 321 ± 35 N with a plunge depth of 600 microns, respectively. Then for the similar material AZ31B it was found that the higher dwell time and larger plunge depth of the tool produced more heat which contributed to greater recrystallization, while the lower plunge depth of the tool and lower dwell time produced less heat so that resulting in a finer grain structure. Meanwhile, in the dissimilar material AA1100-AZ31B, IMC formation was found at the interface between the Al and Mg alloy joints. This IMC was revealed as Al_3Mg_2 formed on Al substrate, and $Al_{12}Mg_{17}$ formed on Mg substrate. The maximum shear load and maximum cross load are 387 ± 17 N and 29 ± 2 N respectively with a dwell time of 700 milliseconds.

Keywords: micro friction stir spot welding, aluminum, magnesium, welding quality

DAFTAR ISI

	<u>Halaman</u>
HALAMAN JUDUL	i
PENGAJUAN DISERTASI.....	ii
PERSETUJUAN DISERTASI.....	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI.....	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	Error! Bookmark not defined.
1.4 Batasan Penelitian	Error! Bookmark not defined.
BAB II KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN	11
2.1 Kerangka Konseptual	11
2.2 Hipotesis Penelitian	34
BAB III TOPIK PENELITIAN I	36
3.1 Abstrak.....	36
3.2 Pendahuluan	37
3.3 Metode.....	39
3.4 Hasil dan Pembahasan	41
3.5 Kesimpulan	66
3.6 Daftar Pustaka	67
BAB IV TOPIK PENELITIAN II.....	68
4.1 Abstrak.....	68
4.2 Pendahuluan	69
4.3 Metode	71
4.4 Hasil dan Pembahasan	74
4.5 Kesimpulan	97
4.6 Daftar Pustaka	98
BAB V TOPIK PENELITIAN III.....	100
5.1 Abstrak.....	100
5.2 Pendahuluan	101
5.3 Metode.....	105
5.4 Hasil dan Pembahasan	107

5.5 Kesimpulan	134
5.6 Daftar Pustaka	135
BAB VI TOPIK PENELITIAN IV.....	137
6.1 Abstrak.....	138
6.2 Pendahuluan	138
6.3 Metode.....	141
6.4 Hasil dan Pembahasan	149
6.5 Kesimpulan	154
6.6 Daftar Pustaka	155
BAB VII PEMBAHASAN UMUM.....	158
7.1 Percobaan I : Karakterisasi Kualitas Pengelasan μ FSSW pada <i>Similar material</i> AA1100	158
7.2 Percobaan II : Karakterisasi Kualitas Pengelasan μ FSSW pada <i>Similar material</i> AZ31B	162
7.3 Percobaan III : Karakterisasi Kualitas Pengelasan μ FSSW pada <i>Dissimilar material</i> AA1100-AZ31B	166
7.4 Percobaan IV : Kontrol Logika Fuzzy untuk Memprediksi Kualitas las pada <i>Micro-Friction Stir Spot Welding</i> dengan <i>Similar material</i> AZ31B	169
BAB VIII KESIMPULAN UMUM	172
8.1 Kesimpulan	172
8.2 Saran	174
DAFTAR PUSTAKA.....	176
LAMPIRAN.....	185

DAFTAR TABEL

	<u>Halaman</u>
Tabel 1. Parameter pengelasan μ FSSW (Baskoro A.S. at al.2013).....	15
Tabel 2. Gaya aksial maksimum dengan beberapa variasi parameter	28
Tabel 3. Komposisi kimia (wt%) dari AA1100	39
Tabel 4. Parameter proses dari μ FSSW	40
Tabel 5. Maksimum temperatur pada dwell time 300 ms.....	58
Tabel 6. Maksimum temperatur pada dwell time 500 ms.....	60
Tabel 7. Maksimum temperatur pada dwell time 700 ms.....	61
Tabel 8. Maksimum gaya aksial pada beberapa variasi parameter	63
Tabel 9. Ringkasan unsur pada similar Al-Al di area 1,2 dan 3 hasil EDS	66
Tabel 10. Komposisi kimia (wt%) dari AZ31B	71
Tabel 11. Parameter proses dari μ FSSW	73
Tabel 12. Maksimum temperatur pada dwell time 300 ms	89
Tabel 13. Maksimum temperatur pada dwell time 500 ms	90
Tabel 14. Maksimum temperatur pada dwell time 700 ms	92
Tabel 15. Maksimum gaya aksial pada beberapa variasi parameter.....	94
Tabel 16. Ringkasan unsur pada similar Mg-Mg di area 1,2 dan 3 hasil EDS	97
Tabel 17. Komposisi kimia (wt%) dari AA1100 dan AZ31B.....	105
Tabel 18. Parameter proses dari μ FSSW	107
Tabel 19. Maksimum temperatur pada dwell time 300 ms	123
Tabel 20. Maksimum temperatur pada dwell time 500 ms	124
Tabel 21. Maksimum temperatur pada dwell time 700 ms	126
Tabel 22. Maksimum gaya aksial pada beberapa variasi parameter.....	128
Tabel 23. Ringkasan unsur pada dissimilar Al-Mg di area 1,2 dan 3 hasil EDS	131
Tabel 24. Komposisi kimia (wt%) dari AZ31B	141
Tabel 25. Proses tingkat parameter μ FSSW	142
Tabel 26. Aturan If-Then untuk sistem fuzzy untuk μ FSSW.....	148
Tabel 27. Hasil eksperimen dan prediksi fuzzy tanpa optimasi dan fuzzy dengan GA pada AZ31B sejenis dengan μ FSSW	150
Tabel 28. Respon model prediksi fuzzy untuk AZ31B sejenis dengan μ FSSW	152
Tabel 29. Hasil uji geometri las pada similar material AA1100.....	Error! Bookmark not defined.
Tabel 30. Hasil rata-rata uji geometri las pada similar material AA1100	Error! Bookmark not defined.
Tabel 31. Hasil pengujian kekuatan tarik geser pada similar material AA1100	Error! Bookmark not defined.
Tabel 32. Hasil pengujian kekuatan tarik silang pada similar material AA1100	Error! Bookmark not defined.
Tabel 33. Hasil perhitungan tegangan geser pada similar material AA1100	Error! Bookmark not defined.
Tabel 34. Hasil perhitungan tegangan silang pada similar material AA1100	Error! Bookmark not defined.
Tabel 35. Hasil perhitungan masukan panas pada similar material AA1100	Error! Bookmark not defined.

Tabel 36. Hasil pengujian microhardness pada similar material AA1100.....	Error!
Bookmark not defined.	
Tabel 37. Hasil uji geometri las pada similar material AZ31B	Error! Bookmark not defined.
Tabel 38. Hasil rata-rata uji geometri las pada similar material AZ31B	Error! Bookmark not defined.
Tabel 39. Hasil pengujian kekuatan tarik geser pada similar material AZ31B.....	Error!
Bookmark not defined.	
Tabel 40. Hasil pengujian kekuatan tarik silang pada similar material AZ31B.....	Error!
Bookmark not defined.	
Tabel 41. Hasil perhitungan tegangan geser pada similar material AZ31B.....	Error!
Bookmark not defined.	
Tabel 42. Hasil perhitungan tegangan silang pada similar material AZ31B.....	Error!
Bookmark not defined.	
Tabel 43. Hasil perhitungan masukan panas pada similar material AZ31B	Error!
Bookmark not defined.	
Tabel 44. Hasil pengujian microhardness pada similar material AZ31B	Error!
Bookmark not defined.	
Tabel 45. Hasil uji geometri las pada dissimilar material AA1100-AZ31B	187
Tabel 46. Hasil rata-rata uji geometri las pada dissimilar material AA1100-AZ31B	187
Tabel 47. Hasil pengujian kekuatan tarik geser pada dissimilar material AA1100-AZ31B	188
Tabel 48. Hasil pengujian kekuatan tarik silang pada dissimilar material AA1100-AZ31B	189
Tabel 49. Hasil perhitungan tegangan geser pada dissimilar material AA1100-AZ31B	190
Tabel 50. Hasil perhitungan tegangan silang pada dissimilar material AA1100-AZ31B	190
Tabel 51. Hasil perhitungan masukan panas pada dissimilar material AA1100-AZ31B	191
Tabel 52. Hasil pengujian microhardness pada dissimilar material AA1100-AZ31B ...	192
Tabel 53. Review penelitian pengelasan FSW dan FSSW pada similar material Al-Al	Error! Bookmark not defined.
Tabel 54. Review penelitian pengelasan FSW dan FSSW pada similar material Mg-Mg	Error! Bookmark not defined.
Tabel 55. Review penelitian pengelasan FSW dan FSSW pada dissimilar material Al-Mg	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR GAMBAR

	<u>Halaman</u>
Gambar 1. Diagram fishbone penelitian μ FSSW	11
Gambar 2. Pemetaan penelitian tentang μ FSSW.....	12
Gambar 3. Pemetaan penelitian tentang μ FSSW pada material Al dan Mg	13
Gambar 4. Mekanisme proses FSSW (Mishra R.S. at al.,2005)	14
Gambar 5. Konfigurasi desain pahat FSW (Mishra and Ma, 2005)	15
Gambar 6. Ilustrasi proses μ FSSW	16
Gambar 7. Daerah-daerah pengelasan FSW (Ahmed and Saha.,2018)	18
Gambar 8. a) spesimen uji tarik geser; b) spesimen uji tarik silang; dan c) spesimen uji metalografi.....	20
Gambar 9. Digital mikroskop (Dino-Lite)	21
Gambar 10. Hasil pengukuran profil diameter nugget las (a) tampak atas dan (b) tampak belakang	21
Gambar 11. Mesin uji tarik Tensilon A&D	22
Gambar 12. dimensi spesimen untuk uji (a) beban geser; (b) beban silang	23
Gambar 13. Titik uji kekerasan untuk a) dissimilar material dan b) similar material	24
Gambar 14. Proses observasi struktur makro dan struktur mikro dengan mikroskop Euromax Oxion Inverso	25
Gambar 15. Hasil pengamatan (a) struktur makro dan (b) struktur mikro menggunakan mikroskop optic	25
Gambar 16. Hasil foto SEM pada daerah patahan dengan perbesaran 700x.....	26
Gambar 17. a) Posisi termokopel pada spesimen dan b) spesimen aluminium.....	27
Gambar 18. Posisi compression load cell	27
Gambar 19. Distribusi gaya aksial pada dissimilar Al-Mg dengan dwell time: a) 300 milidetik, b) 500 milidetik dan c) 700 milidetik	29
Gambar 20. Flash yang besar akibat panas berlebih (Lee C. Y. at al.,2008)	30
Gambar 21. Contoh cacat las dari jenis 2 dan 3(Lee C. Y. at al.,2008).....	30
Gambar 22. Dimensi benda uji untuk pengujian: a – beban geser; b - beban tarik silang; c – metalografi.....	40
Gambar 23. Dimensi pahat (a) pin 600 dan (b) two-stage shoulder	40

Gambar 24. Hasil pengukuran diameter nugget las bagian atas material Al-Al	41
Gambar 25. Hasil pengukuran luas area TMAZ pada bagian belakang material Al-Al ..	42
Gambar 26. Geometri las μ FSSW dari material Al-Al (a) diameter pin, (b) diameter shoulder, (c) kedalaman tusuk terukur, dan (d) luas area TMAZ	43
Gambar 27. Uji tarik μ FSSW material Al-Al, maksimum (a) shear load dan (b) cross load.....	44
Gambar 28. Maksimum tegangan pada material Al-Al, (a) shear stress dan (b) cross stress.....	45
Gambar 29. Distribusi masukan panas pada similar Al-Al dengan dwell time 300 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron.....	47
Gambar 30. Maksimum masukan panas pada similar material Al-Al	48
Gambar 31. Lokasi titik pengujian kekerasan mikro pada similar Al-Al dan parameter dwell time: a) 300 ms, b) 500 ms dan c) 700 ms	48
Gambar 32. Grafik uji microhardness pada similar Al-Al.....	49
Gambar 33. Struktur makro dengan material Al-Al dalam beberapa variasi dwell time dan tool.....	50
Gambar 34. Metalografi Al-Al pada dwell time 300 milidetik dan tool 1: (a) struktur makro, (b) struktur mikro area A, (c) struktur mikro area B, (d) struktur mikro area C, dan (e, f) struktur mikro dengan perbesaran tinggi.....	51
Gambar 35. Metalografi Al-Al pada dwell time 500 milidetik dan tool 1: (a) struktur makro, (b) struktur mikro area A, (c) struktur mikro area B, (d) struktur mikro area C, dan (e, f) struktur mikro dengan perbesaran tinggi.....	52
Gambar 36. Metalografi Al-Al pada dwell time 700 milidetik dan tool 1: (a) struktur makro, (b) struktur mikro area A, (c) struktur mikro area B, (d) struktur mikro area C, dan (e, f) struktur mikro dengan perbesaran tinggi.....	52
Gambar 37. Metalografi Al-Al pada dwell time 300 milidetik dan tool 2: (a) struktur makro, (b) struktur mikro area A, (c) struktur mikro area B, (d) struktur mikro area C, dan (e, f) struktur mikro dengan perbesaran tinggi.....	53
Gambar 38. Metalografi Al-Al pada dwell time 500 milidetik dan tool 2: (a) struktur makro, (b) struktur mikro area A, (c) struktur mikro area B, (d) struktur mikro area C, dan (e, f) struktur mikro dengan perbesaran tinggi.....	54
Gambar 39. Metalografi Al-Al pada dwell time 700 milidetik dan tool 2: (a) struktur makro, (b) struktur mikro area A, (c) struktur mikro area B, (d) struktur mikro area C, dan (e, f) struktur mikro dengan perbesaran tinggi.....	55
Gambar 40. Distribusi temperatur dan rpm pada similar Al-Al dengan dwell time 300 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron.....	57
Gambar 41. Distribusi temperatur dan rpm pada similar Al-Al dengan dwell time 500 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron.....	59
Gambar 42. Distribusi temperatur dan rpm pada similar Al-Al dengan dwell time 700 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron.....	60
Gambar 43. Distribusi gaya aksial pada similar Al-Al dengan dwell time: a) 300 milidetik, b) 500 milidetik dan c) 700 milidetik	62
Gambar 44. SEM lokasi patahan shear tensile test pada similar Al-Al: a) perbesaran rendah, b) perbesaran tinggi pada area 1 dan c) perbesaran tinggi pada area 2	64
Gambar 45. Lokasi pengambilan area uji EDS pada similar Al-Al.....	64
Gambar 46. Spektrum EDS pada similar Al-Al dari area a) 1, b) 2 dan c) 3	65

Gambar 47. Dimensi benda uji untuk pengujian: a – beban geser; b - beban tarik silang; c – metalografi.....	72
Gambar 48. Dimensi pahat micro-Friction Stir Spot Welding.....	72
Gambar 49. Hasil pengukuran diameter nugget las bagian atas material Mg-Mg.....	74
Gambar 50. Hasil pengukuran luas area TMAZ pada bagian belakang material Mg-Mg.....	75
Gambar 51. Geometri las μ FSSW dari material Mg-Mg (a) diameter pin, (b) diameter shoulder, (c) kedalaman tusuk terukur, dan (d) luas area TMAZ	76
Gambar 52. Uji tarik μ FSSW material Mg-Mg, maksimum (a) shear load dan (b) cross load.....	77
Gambar 53. Maksimum tegangan pada material Mg-Mg, (a) shear stress dan (b) cross stress.....	78
Gambar 54. Distribusi masukan panas pada similar Mg-Mg dengan dwell time 300 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron.....	80
Gambar 55. Maksimum masukan panas pada similar material Mg-Mg	81
Gambar 56. Lokasi titik pengujian kekerasan mikro pada similar Mg-Mg dan dwell time: a) 300 ms, b) 500 ms dan c) 700 ms	82
Gambar 57. Grafik uji microhardness pada similar Mg-Mg.....	83
Gambar 58. Struktur makro dengan material Mg-Mg pada beberapa variasi dwell time dan plunge depth.....	84
Gambar 59. (a) Struktur makro Mg-Mg pada dwell time 300 ms dan plunge depth 500 mikron, (b) struktur mikro area b, dan (c) struktur mikro area c dengan tool 1.....	84
Gambar 60. (a) Struktur makro Mg-Mg pada dwell time 500 ms dan plunge depth 500 mikron, (b) struktur mikro area b, dan (c) struktur mikro area c dengan tool 1.....	85
Gambar 61. (a) Struktur makro Mg-Mg pada dwell time 700 ms dan plunge depth 500 mikron, (b) struktur mikro area b, dan (c) struktur mikro area c	86
Gambar 62. Distribusi temperature dan rpm pada similar Mg-Mg dengan dwell time 300 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron.....	88
Gambar 63. Distribusi temperature dan rpm pada similar Mg-Mg dengan dwell time 500 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron.....	89
Gambar 64. Distribusi temperature dan rpm pada similar Mg-Mg dengan dwell time 700 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron.....	91
Gambar 65. Distribusi gaya aksial pada similar Mg-Mg dengan dwell time: a) 300 milidetik, b) 500 milidetik dan c) 700 milidetik	93
Gambar 66. SEM lokasi patahan shear tensile test pada similar Mg-Mg dengan tool 1: a) perbesaran rendah, b) perbesaran tinggi pada area 1 dan c) perbesaran tinggi pada area 2	95
Gambar 67. Lokasi pengambilan area uji EDS pada similar Mg-Mg.....	95
Gambar 68. Spektrum EDS pada similar Mg-Mg dengan tool 1 dari area a) 1, b) 2 dan c) 3	96
Gambar 69. Dimensi benda uji untuk pengujian: a – beban geser; b - beban tarik silang; c – metalografi.....	106
Gambar 70. Dimensi pahat micro-Friction Stir Spot Welding.....	106
Gambar 71. Hasil lasan Micro-Friction Stir Spot Welding untuk benda uji: a – tarik geser; b - tarik silang; c – metalografi.....	108

Gambar 72. Hasil las dari micro-Friction Stir Spot Welding pada tampak atas dan pengukuran diameter nugget.....	108
Gambar 73. Hasil las dari micro-Friction Stir Spot Welding pada tampak belakang dan pengukuran luas Thermo-Mechanically Affected Zone.....	109
Gambar 74. Geometri las micro-Friction Stir Spot Welding: a – diameter pin; b – diameter shoulder; c – plunge depth terukur; d – Area Thermo-Mechanically Affected Zone	110
Gambar 75. Mode Fraktur Micro-Friction Stir Spot Welding: a – tarik geser; b – tarik silang	111
Gambar 76. Uji Tarik Micro-Friction Stir Spot Welding dari: a – maks. beban geser; b- maks. beban silang	112
Gambar 77. Maksimum tegangan pada material Al-Mg, (a) shear stress dan (b) cross stress.....	113
Gambar 78. Distribusi masukan panas pada dissimilar Al-Mg dengan dwell time 300 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron.....	114
Gambar 79. Maksimum masukan panas pada dissimilar material Al-Mg	115
Gambar 80. Lokasi titik pengujian kekerasan mikro pada dissimilar Al-Mg dan dwell time: a) 300 ms, b) 500 ms dan c) 700 ms.....	116
Gambar 81. Grafik uji microhardness pada dissimilar Al-Mg dengan tool 1 dan dwell time: a) 300 ms, b) 500 ms dan c) 700 ms.....	117
Gambar 82. Metalografi Al-Mg pada dwell time 300 milidetik: a – struktur makro; b – struktur mikro daerah b; c – struktur mikro area c.....	118
Gambar 83. Metalografi Al-Mg pada dwell time 500 milidetik: a – struktur makro; b – struktur mikro daerah b; c – struktur mikro area c.....	120
Gambar 84. Metalografi Al-Mg pada dwell time 700 milidetik: a – struktur makro; b – struktur mikro daerah b; c – struktur mikro area c.....	121
Gambar 85. Distribusi temperature dan rpm pada dissimilar Al-Mg dengan dwell time 300 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron	122
Gambar 86. Distribusi temperature dan rpm pada dissimilar Al-Mg dengan dwell time 500 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron	123
Gambar 87. Distribusi temperature dan rpm pada dissimilar Al-Mg dengan dwell time 700 milidetik dan plunge depth: a) 400 mikron, b) 500 mikron dan c) 600 mikron	125
Gambar 88. Distribusi gaya aksial pada dissimilar Al-Mg dengan dwell time: a) 300 milidetik, b) 500 milidetik dan c) 700 milidetik	127
Gambar 89. Lokasi pengujian SEM dan EDS pada lokasi patahan shear tensile test pada dissimilar Al-Mg.....	128
Gambar 90. SEM lokasi patahan shear tensile test pada dissimilar Al-Mg dengan tool 1: a) perbesaran rendah, b) perbesaran tinggi pada area 1 dan c) perbesaran tinggi pada area 2	129
Gambar 91. Lokasi pengambilan area uji EDS pada dissimilar Al-Mg.....	130
Gambar 92. Spektrum EDS pada dissimilar Al-Mg dengan tool 1 dari area a) 1, b) 2 dan c) 3	130
Gambar 93. Skema pembentukan hook dan extrude zone pada plat (Baskoro et al., 2020)	134
Gambar 94. Dimensi benda uji (a) tarik geser, (b) tarik silang, dan (c) uji metalografi	141
Gambar 95. Dimensi μ FSSW tool.....	142

Gambar 96. Fungsi keanggotaan segitiga untuk input dan output sistem fuzzy	143
Gambar 97. Model fuzzy yang diusulkan untuk AZ31B serupa dengan μ FSSW	143
Gambar 98. Implementasi input MF untuk AZ31B serupa dengan μ FSSW.....	144
Gambar 99. Implementasi MF keluaran untuk AZ31B sejenis dengan μ FSSW.....	145
Gambar 100. Model keluaran basis fuzzy untuk AZ31B serupa dengan μ FSSW.....	145
Gambar 101. Model fuzzy yang diusulkan dengan GA untuk AZ31B serupa dengan μ FSSW.....	146
Gambar 102. Implementasi input MF dengan GA untuk AZ31B sejenis dengan μ FSSW	147
Gambar 103. Implementasi keluaran MF dengan GA untuk AZ31B sejenis dengan μ FSSW.....	147
Gambar 104. Model keluaran basis fuzzy dengan GA untuk AZ31B serupa dengan μ FSSW.....	148
Gambar 105. Hasil las μ FSSW untuk benda uji: (a) tarik geser, (b) tarik silang, dan (c) uji metalografi.....	149
Gambar 106. Perbandingan hasil eksperimen dan logika fuzzy untuk (a) diameter pin, (b) luas TMAZ, dan (c) tarik silang	151
Gambar 107. Model permukaan respon logika fuzzy tanpa optimasi dan logika fuzzy dengan GA untuk (a, b) diameter pin, (c, d) area TMAZ, dan (e, f) cross-tensile	153
Gambar 108. Diagram alir penelitian	Error! Bookmark not defined.
Gambar 109. Skema pengambilan data	Error! Bookmark not defined.
Gambar 110. Digital mikroskop (Dino-Lite)	Error! Bookmark not defined.
Gambar 111. Hasil pengukuran profil diameter nugget las (a) tampak atas dan (b) tampak belakang	Error! Bookmark not defined.
Gambar 112. a) Surfcom 2900SD3 dan b) Hasil pengukuran kedalaman las	Error! Bookmark not defined.
Gambar 113. Dimensi spesimen untuk uji (a) tensile shear load dan (b) cross tensile load	Error! Bookmark not defined.
Gambar 114. Titik uji kekerasan untuk a) dissimilar material dan b) similar material	Error! Bookmark not defined.
Gambar 115. Proses observasi struktur makro dan struktur mikro dengan mikroskop Euromax Oxion Inverso	Error! Bookmark not defined.
Gambar 116. Hasil pengamatan (a) struktur makro dan (b) struktur mikro menggunakan mikroskop optic	Error! Bookmark not defined.
Gambar 117. a) Posisi Termokopel pada anvil dan b) anvil.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 118. Posisi compression load cell di anvil.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 119. a) Hasil foto SEM pada daerah patahan dan b) Lokasi pengambilan area uji EDS.....	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR LAMPIRAN

	<u>Halaman</u>
Lampiran 1. Diagram alir penelitian dan proses pengelasan μ FSSW .. Error! Bookmark not defined.	
Lampiran 2. Proses pengujian hasil lasan μ FSSW..... Error! Bookmark not defined.	
Lampiran 3. Data hasil penelitian μ FSSW 186	186
Lampiran 4. Review penelitian pengelasan FSW dan FSSW Error! Bookmark not defined.	
Lampiran 5. Draft artikel hasil penelitian 193	193

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/singkatan	Arti dan keterangan
σ_{cross}	= Tegangan Silang (N/mm ²)
σ_{shear}	= Tegangan Geser (N/mm ²)
F_{cross}	= Gaya aksial pada spesimen uji silang (N)
F_{shear}	= Gaya aksial pada spesimen uji geser (N)
A_{cross}	= Luas area nugget pada spesimen uji silang (mm ²)
A_{shear}	= Luas area nugget pada spesimen uji geser (mm ²)
μ	= Koefisien gesek
Al	= Aluminium
CTT	= <i>Cross Tensile Test</i>
DT	= <i>Dwell time</i>
EDS	= <i>Energy Dispersion Spectroscopy</i>
EXTD	= <i>Extrude zone</i>
FSSW	= <i>Friction Stir Spot Welding</i>
FSW	= <i>Friction Stir Welding</i>
FTZ	= <i>Flow Transition Zone</i>
GA	= <i>Genetic Algorithm</i>
GMAW	= <i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	= <i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HAZ	= <i>Heat Affected Zone</i>

HNO ₃	=	Asam Nitrat
HSS	=	<i>High Speed Steel</i>
HV	=	<i>Hardness Value</i>
IMC	=	<i>Intermetallic compound</i>
K _A	=	Rasio radius bahu tool dan radius pin tool
kgf	=	<i>Kilogram-Force</i>
kN	=	Kilo Newton
LED	=	<i>Light Emitting Diode</i>
MF	=	<i>Membership Function</i>
Mg	=	Magnesium
mm	=	Milimeter
MPa	=	<i>Mega Pascal</i>
ms	=	<i>Millisecond</i>
N	=	<i>Newton</i>
NaOH	=	Sodium Hidroksida
NZ	=	<i>Nugget Zone</i>
OES	=	<i>Optical Emission Spectrometer</i>
P	=	Gaya aksial (N)
PD	=	<i>Plunge depth</i>
Q	=	Masukan panas (J)
r	=	Radius tool pin (mm)
RMSE	=	<i>Root mean square error</i>
RPM	=	<i>Revolution Per Minute</i>
RSM	=	<i>Response Surface Methodology</i>
SEM	=	<i>Scanning Electron Mycroscopy</i>
STT	=	<i>Shear Tensile Test</i>
SZ	=	<i>Stir zone</i>
t	=	<i>Dwell time (detik)</i>
T _{1,2,3,4}	=	<i>Thermocouple 1, 2, 3 dan 4</i>
TiO ₂	=	<i>Titanium Dioksida</i>
TMAZ	=	<i>Thermo-Mechanically Affected Zone</i>
TWI	=	<i>The Welding Institute</i>
TZ	=	<i>Torsion Zone</i>
USB	=	<i>Universal Serial Bus</i>
μFSSW	=	<i>Micro Friction Stir Spot Welding</i>
μFSW	=	<i>Micro Friction Stir Welding</i>
μm	=	Mikron
ω	=	Kecepatan putar spindel (rpm)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelasan logam, khususnya pada *material* aluminium merupakan salah satu proses manufaktur yang sedang dikembangkan dalam dunia industri manufaktur, aerospace, otomotif dan *packaging electronics*. Studi mengenai pengelasan aluminium sering dilakukan terutama yang berfokus pada *material* yang digunakan, komposisi kimia dan sifat mekanis benda kerja, serta semua parameter-parameter proses yang mempengaruhi efisiensi dan kualitas produk. Pengelasan aluminium yang ketebalannya kurang dari 1000 μm masih relatif sulit dilakukan pengelasan konvensional biasa. Maka dari itu diperlukan suatu proses pengelasan yang dapat meminimalkan distorsi dan *defect*, salah satunya adalah proses *Micro Friction Stir Welding* (μFSW) dan *Micro Friction Stir Spot Welding* (μFSSW) yang merupakan turunan dari proses *Friction Stir Welding* (FSW) yang dikembangkan oleh *The Welding Institute* pada tahun 1991 (W.M.Thomas, 1991).

Proses FSW sering digunakan karena kekuatan dan keuletannya yang baik bersama dengan meminimalkan tegangan sisa dan distorsi *material* induk. FSW dianggap sebagai perkembangan paling signifikan dalam perkembangan pengelasan logam dalam satu dekade dan merupakan “*green technology*” karena efisiensi energinya, keramahan lingkungan, dan keserbagunaannya. Dibandingkan dengan metode pengelasan konvensional, FSW mengkonsumsi energi yang jauh lebih sedikit. Tidak ada gas penutup atau fluks yang digunakan, sehingga membuat prosesnya ramah lingkungan. Hingga sampai saat ini proses pengelasan aluminium yang memiliki ketebalan kurang dari 1000 μm masih dikembangkan (Threadgill, 1997, Mahoney et al., 1998, Mishra and Ma, 2005a, Rodrigues et al., 2009, Scialpi et al., 2008, Baskoro et al., 2013, Huang et al., 2017, Baskoro et al., 2019). Apabila penggunaan parameter yang tidak tepat pada proses pengelasan *Micro Friction Stir Welding* (μFSW) dalam *material* tersebut akan menghasilkan *mechanical properties* yang tidak optimal, terbentuknya *residual stress*, dan terbentuknya *defect* seperti *hook defect* (Nandan et al., 2008). Proses pengelasan *friction stir welding* antara AA2024 dengan AA7075 dengan sambungan tipe *lap*

joint menghasilkan bahwa ketika seri AA2024 pada sisi atas (*advancing side*) timbul void sedangkan ketika posisi seri AA7075 yang mempunyai sifat mekanik lebih kuat di atas (*advancing side*) void tidak timbul. Tegangan geser pada sambungan las mengalami kenaikan seiring dengan meningkatnya kecepatan pengelasan (Song et al., 2014).

Friction stir welding (FSW) memiliki keunggulan dibandingkan pengelasan fusi dalam pengelasan logam yang berbeda. FSW menawarkan banyak keuntungan dalam menekan terjadinya cacat las seperti lubang pukulan, segregasi, retakan dan generasi IMC (Song et al., 2014). Keunggulan menarik ini menjadikan FSW intensif digunakan dalam pengelasan logam yang berbeda. Studi tentang FSW aluminium dan baja telah banyak dilakukan. Xiong JT dibuat sambungan tumpukan dari aluminium dan stainless steel dengan FSW dan penambahan cutting *pin*. Pembentukan sambungan menyeluruh yang dihasilkan dari ikatan baja yang dihubungkan ke aluminium atas kedua sisi dasar nugget dan ikatan mekanis dari sambungan menyeluruh dibentuk pada antarmuka aluminium/baja. Lapisan IMC yang rapuh (FeAl_3) ditemukan pada antarmuka yang bergabung. Analisis EDS mengungkapkan bahwa permukaan fraktur ditutupi oleh lapisan aluminium tipis dan IMC. Selain itu, simulasi numerik digunakan untuk mengoptimalkan FSW Al/baja. Pengelasan FSW dari Al/steel telah banyak dicapai, namun upaya untuk mendapatkan teknologi penyambungan logam tak sejenis masih terus dilakukan. Salah satu yang patut dicoba adalah penyambungan antara paduan magnesium dengan paduan aluminium.

Penyambungan *material* antara paduan aluminium dengan paduan magnesium telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti (Mohammadi et al., 2015, Firouzdar and Kou, 2009, Kwon et al., 2008, Chen and Nakata, 2008, Kostka et al., 2009). Hirano (Hirano, 2003) melakukan proses pengelasan FSW pada logam berbeda antara Al 1050 dan AZ31 Mg pada ketebalan 4 mm dengan menghasilkan sifat mekanik yang masih wajar. Demikian juga, Kostka (Kostka et al., 2009) menemukan bahwa selama pengelasan gesekan dari paduan Al 6040 dan AZ31 dengan ketebalan plat 4 mm, kecepatan perjalanan yang relatif tinggi (225 mm/mnt) dan kecepatan rotasi pahat (1400 rpm) diperlukan untuk mendapatkan sambungan yang sukses, namun, keberadaan $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ dan fase

intermetalik Al_3Mg_2 masih dicatat oleh mikroskop elektron. Ketika Sato (Sato et al., 2004) mengelas Al 1050 dengan paduan AZ31 dengan ketebalan plat 3 mm menggunakan pengelasan FSW pada kecepatan rotasi 2450 rpm menggunakan kecepatan gerak 90 mm/mnt, diamati zona yang diaduk dengan bentuk tidak beraturan yang mengandung retakan yang kemungkinan dihasilkan dari pembentukan intermetalik.

Firouzdor dan Kou (Firouzdor and Kou, 2010) melakukan penelitian antara aluminium 6061-T6 dengan magnesium AZ31B-H 24 dengan ketebalan 1,6 mm menggunakan pengelasan FSW melaporkan bahwa temperatur puncak yang terjadi akan berkurang seiring meningkatnya kecepatan perjalanan. Hal lain yang mempengaruhi besarnya temperatur yang terjadi dalam proses FSW adalah diameter dari *shoulder tool* yang digunakan, semakin besar diameter maka temperaturnya akan semakin tinggi begitu pula sebaliknya (Zhang et al., 2009). Selain itu dampak dari temperatur yang dihasilkan pada proses FSW adalah pada mikrostruktur yang terbentuk akibat perbedaan panas seperti yang telah dilaporkan oleh Mohammadi (Mohammadi et al., 2015) dan Firouzdor (Firouzdor and Kou, 2010). Thermal yang terjadi selama proses pengelasan akan berdampak pada ukuran butir pada daerah adukan (Rodrigues et al., 2009). Ni dkk (Ni et al., 2019) melaporkan hasil kekuatan uji kekerasan *material* pada aluminium AA7075-T6 berbentuk W dimana ada penurunan pada daerah HAZ kemudian peningkatan pada daerah TMAZ dan NZ. Hal ini karena perbedaan ukuran butir yang terjadi selama proses pengelasan yang terjadi karena perbedaan temperatur. Selain kekerasan *material* yang terpengaruh, kekuatan tarik *material* juga akan berpengaruh terhadap thermal selama proses pengelasan seperti yang dilaporkan oleh Rodrigues dkk (Rodrigues et al., 2009) dengan menggunakan aluminium AA6061-T4.

Penyambungan paduan aluminium dan baja, merupakan sebuah tantangan karena perbedaan besar dalam sifat kimia dan fisika dari kedua jenis logam. perbedaan besar yang dihasilkan dari penggabungan antara paduan aluminium dan baja, dalam ekspansi termal pengelasan fusi akan menghasilkan residu besar, stres, serta munculnya senyawa intermetalik getas pada sendi . Beberapa upaya telah dilakukan untuk meningkatkan kekuatan sambungan dengan cara

mengendalikan terbentuknya IMC pada daerah lasan yang bertujuan untuk menghilangkan atau mengurangi efek negatif yang timbul. sampai sekarang, ada tiga pendekatan penelitian utama telah digunakan, antara lain: Pertama, teknik dengan suhu pengelasan rendah digunakan untuk mengurangi IMC. Dengan pendekatan ini, proses solid state yang melibatkan suhu yang relatif rendah, seperti pengelasan gesekan dan ikatan difusi, dapat mencapai kekuatan yang relatif tinggi. Kedua, variasi dan distribusi IMC dikendalikan untuk menghindari degradasi kekuatan sambungan dalam pengelasan fusi. Dengan pendekatan ini, menggunakan logam pengisi untuk paduan lebih lanjut lapisan las digunakan dalam pengelasan laser, pengelasan busur, dan pengelasan hybrid laser-arc. Sementara itu, ikatan las termasuk ikatan las laser dan ikatan perekat dengan gesekan, digunakan untuk bergabung dengan Mg dan Al. Kehadiran perekat pada sambungan las dapat meningkatkan struktur mikro dan kinerja mekanis dari pengelasan Al/Mg. Ketiga, pengelasan eksplosif, pengelasan ultrasonik, pengelasan titik resisten, dan pengelasan dampak elektromagnetik digunakan untuk mengurangi IMC karena teknik ini memiliki waktu reaksi relatif singkat dan energi rendah.

Penentuan kombinasi faktor yang tepat untuk mencapai respon yang optimum telah menjadi fokus penelitian pada proses pengelasan μ FSW dan μ FSSW. Dalam hal ini pemilihan metode akan berkaitan langsung dengan kualitas produk yang dihasilkan. Metode Taguchi merupakan salah satu metode yang efektif untuk mengendalikan kualitas produk secara *off-line*, yaitu usaha pengendalian atau perbaikan kualitas yang dimulai dari perancangan hingga pemrosesan produk. Metode ini sangat efektif untuk melakukan perbaikan kualitas, serta pengurangan biaya dalam pembuatan produk maupun pengembangan produk. Studi metalurgi dan mekanik pada *Friction Stir Welding* (FSW) yang berbeda dari aluminium 1050 dan kuningan (CuZn_{30}) menggunakan metode Taguchi juga telah dilakukan. Hasil penelitian tersebut didapatkan nilai kekuatan tarik akhir maksimum sambungan yang telah dicapai dalam penelitian ini adalah 80% dari logam dasar Aluminium (Esmaeili et al., 2011). Tutar, dkk (Tutar et al., 2014) meneliti parameter pengelasan *friction stir spot welding* (μ FSSW) pada *material* AA3003-H12 menggunakan metode Taguchi dengan

rancangan percobaan L₉. Parameter pengelasan yang digunakan antara lain, *tool rotational speed*, *tool pluge depth* dan *dwell time*. Variabel respon yang diamati adalah *tensile shear load*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *tool plunge* memiliki kontribusi yang paling signifikan dalam kenaikan *tensile shear load*. Patahan yang terjadi ketika dilakukan pengujian tarik berada pada daerah *stir zone* (SZ).

Metode Taguchi hanya dapat mengoptimasi proses pada satu respon. Adanya metode seperti *analisis neural network*, genetic algoritma, *grey relational analysis*, *fuzzy logic* dan *response surface methodology* (RSM) membuat metode Taguchi dapat digunakan untuk melakukan optimasi terhadap beberapa respon secara serentak. Optimasi proses pengelasan FSW yang menggunakan parameter *tool rotational speed*, *welding speed*, *axial force* terhadap *response tensile strength*, *yield strength*, dan *elongation* dilakukan dengan metode optimasi *central composite design* yang dikombinasikan dengan *response surface methodology* (RSM) (Elatharasan and Kumar, 2013). Hasil penelitian tersebut *tensile strength* dan *yield strength* pada sambungan las dapat dinaikan dengan meningkatkan *tool relational speed*, *tool axial*, *welding speed*.

Penelitian tentang pengelasan μ FSW untuk *material* paduan aluminium dan paduan magnesium dengan ketebalan < 1 mm masih sangat sedikit. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk menganalisa dan karakterisasi pengaruh proses pengelasan *Micro Friction Stir Spot Welding* (μ FSSW) terhadap karakteristik kualitas hasil pengelasan meliputi *mechanichal properties* (*tensile shear load*, *cross tensile load* dan *microhardness*), analisis struktur mikro, *defect* dan *fracture mechanics* sehingga menghasilkan sambungan berkualitas antara magnesium dan aluminium dengan ketebalan < 1 mm. Penelitian ini akan dilakukan pada *material* yang sama (*similar*) dan *material* berbeda (*dissimilar*). Selain itu, dari penelitian ini, akan dapat diketahui pula kombinasi parameter–parameter proses pengelasan μ FSW untuk menghasilkan variabel-variabel respon yang optimal.

Penelitian tentang *intermetallic compound* (IMC) telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Qiu dkk (Qiu et al., 2009) meneliti tentang reaksi intermetalik di *interface* sambungan las *material* tak sejenis antara Aluminium

A5052/SUS304 dan A5052/SPCC terhadap kekuatan tarik sambungan las pada *resistance spot welding* dengan *cover plate*. Hasilnya dapat dianalisa bahwa kekuatan tarik sambungan baja dengan aluminium paduan dipengaruhi oleh fraksi reaksi lapisan diskontinyu pada *cover plate*. Hong-gang dkk (Dong et al., 2012) meneliti tentang pengaruh intermetalik terhadap kekuatan tarik geser pada *interface* sambungan las *material* tak sejenis antara aluminium paduan dengan baja karbon rendah dengan *filler* pada pengelasan logam GTAW. Taban dkk. (Taban et al., 2010) menyambung *material* AL 6061 dan AISI 1018 untuk mempelajari sifat dan karakteristik stuktur mikro dengan menggunakan metode FSW, hasilnya menyatakan bahwa lapisan intermetalik yang terbentuk dapat mempengaruhi kekuatan sambungan.

Penelitian tersebut menerangkan tentang pengaruh reaksi intermetalik di *interface* sambungan las dengan beberapa metode pengelasan yang berbeda. Jenis dan morfologi reaksi produk yang terbentuk pada *interface* lasan terkait dengan kombinasi bahan atau metode pengelasan yang digunakan (Qiu et al., 2009). Dengan demikian pemahaman tentang karakteristik reaksi intermetalik di *interface* lasan sangat penting untuk di kaji lebih dalam. Ramachandran KK dkk (Ramachandran et al., 2015) menyelidiki pengaruh offset sumbu pahat dan geometri profil *pin* pahat pada karakteristik gesekan sambungan butt joint dari aluminium dan baja HSLA. Di bawah parameter yang diberikan, sambungan terbaik dengan kekuatan sambungan 188 MPa diperoleh dengan sudut lancip spesifik dari *pin* alat silinder lancip dan offset sumbu. Lapisan IMC (Fe_2Al_5 , FeAl , FeAl_3) ditemukan pada antarmuka yang bergabung dan perpaduan fraktur getas dan getas terjadi pada antarmuka.

Untuk menghindari masalah ini, Kuang BB dkk (Kuang et al., 2015) menggunakan Zn foil sebagai logam pengisi untuk melakukan pengelasan gesekan putaran (FSLW) dari Al menjadi Cu murni, karena Al dan Cu dapat membentuk paduan dengan Zn sesuai dengan diagram fase. Menurut diagram fase Zn-Fe, Zn dan baja dapat menghasilkan intermetalik (Han et al., 2018). Yang J dkk (Yang et al., 2018) menambahkan Zn ke zona fusi Sambungan Al/baja yang dicapai dengan pengelasan laser. Karena penambahan Zn, maka IMC pada sambungan Al/baja berubah dari Fe_2Al_5 berlapis dan FeAl_3 seperti jarum menjadi

$\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{-xZn}_x$ berlapis dan mendispersikan FeZn_{10} dengan fase amorf kecil yang kaya Al. Sambungan dengan penambahan Zn menunjukkan peningkatan kekuatan sendi yang signifikan, dibandingkan dengan sambungan tanpa penambahan Zn. Alasan untuk efek ini adalah FeZn_{10} memiliki kekerasan dan kerapuhan yang lebih rendah daripada FeAl , Al_5Fe_2 dan FeAl_3 . Peningkatan kekuatan sambungan antara Al/baja yang dibuat oleh FSLW dengan Zn sebagai pengisi logam memiliki peluang bagus, karena FeZn_{10} menunjukkan kekerasan dan kerapuhan yang rendah.

Sebagian besar penelitian mengenai pengelasan dissimilar micro friction stir spot welding (μFSSW) pada sambungan material magnesium dan aluminium masih relatif jarang diteliti. Penggunaan material tipis dengan ketebalan < 1 mm pada paduan magnesium dan aluminium juga masih sangat jarang diteliti. Banyak penelitian terdahulu yang menggunakan material paduan aluminium, stainless steel, baja dengan ketebalan yang variatif dengan metode pengelasan micro friction stir spot welding (μFSSW). IMC yang terbentuk dari proses pengelasan dissimilar juga menjadi suatu tantangan tersendiri untuk menyambung magnesium dan aluminium. Sehingga keterbaruan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan karakterisasi kualitas hasil las dan dampak thermal dari pengelasan *similar* dan *dissimilar micro friction stir spot welding* (μFSSW) pada sambungan aluminium dan magnesium dengan ketebalan < 1 mm.

1.2 Rumusan Masalah

Penggunaan parameter proses yang tidak tepat dapat menyebabkan karakteristik kualitas pengelasan seperti *tensile shear load*, *microhardness* menjadi tidak optimal. Selain itu, pada pengelasan *material* yang berbeda seringkali terbentuk *intermetallic compound* (IMC), di mana IMC dapat menyebabkan hasil pengelasan mengalami patah getas. Sehingga dibutuhkan penelitian mengenai pemilihan *material* dan pemilihan parameter proses, level dan kombinasi parameter proses μFSSW agar menghasilkan kualitas hasil pengelasan (*tensile shear load*, *microhardness* dan *residual stress*), serta mengurangi terbentuknya IMC dan defect. Sehingga rumusan masalah yang dapat dibuat sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *dwelt time* dan *plunge depth* terhadap geometri las (diameter nugget dan kedalaman las), sifat mekanik (*tensile shear load*, *cross tensile load* dan *microhardness*), struktur makro, struktur mikro dan *fracture* (SEM &EDS) yang terbentuk pada proses pengelasan μ FSSW *similar material* AA1100?
2. Bagaimana pengaruh *dwelt time* dan *plunge depth* terhadap geometri las (diameter nugget dan kedalaman las), sifat mekanik (*tensile shear load*, *cross tensile load* dan *microhardness*), struktur makro, struktur mikro dan *fracture* (SEM &EDS) yang terbentuk pada proses pengelasan μ FSSW *similar material* AZ31B?
3. Bagaimana pengaruh *dwelt time* dan *plunge depth* terhadap geometri las (diameter nugget dan kedalaman las), sifat mekanik (*tensile shear load*, *cross tensile load* dan *microhardness*), struktur makro, struktur mikro dan *fracture* (SEM &EDS) yang terbentuk pada proses pengelasan μ FSSW *dissimilar material* AA1100-AZ31B?
4. Bagaimana memprediksi kualitas hasil lasan pada pengelasan μ FSSW dengan variasi *dwelt time* dan *plunge depth* menggunakan pendekatan logika fuzzy untuk *similar material* AZ31B?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Mendapatkan karakteristik kualitas hasil pengelasan μ FSSW pada sambungan *similar* aluminium AA1100 seperti geometri las, kekuatan mekanik, struktur makro, struktur mikro, mekanise patahan dan mendapatkan sambungan pengelasan yang bebas cacat;
2. Mendapatkan karakteristik kualitas hasil pengelasan μ FSSW pada sambungan *similar* magnesium AZ31B seperti geometri las, kekuatan mekanik, struktur makro, struktur mikro, mekanise patahan dan mendapatkan sambungan pengelasan yang bebas cacat,
3. Mendapatkan karakteristik kualitas hasil pengelasan μ FSSW pada sambungan *dissimilar* Al-Mg seperti kekuatan mekanik, struktur makro, struktur mikro, mekanise patahan dan mendapatkan sambungan pengelasan yang bebas cacat.

4. Mendapatkan nilai parameter pengelasan μ FSSW yang optimal untuk menghasilkan kualitas lasan yang optimal dengan menggunakan metode logika fuzzy.

1.4 Batasan Penelitian

Proses pengelasan material logam aluminium dan magnesium berupa lembaran tipis dengan ketebalan kurang dari 1000 μ m membutuhkan teknik pengelasan yang tepat, untuk penyambungan material logam yang tak sejenis (*dissimilar*) material logam yang akan dilas memiliki sifat mekanik dan thermal yang berbeda. oleh karena itu, dalam penelitian ini dengan mempertimbangkan ketersediaan sarana dan prasarana yang tersedia maka, penelitian ini dibatasi pada:

1. Material yang digunakan adalah lembaran aluminium seri AA1100 dan magnesium seri AZ31B dengan ketebalan masing-masing 0,3 mm dan 0,5 mm;
2. Pahat yang digunakan berbentuk silindris dengan dimensi ϕ *shoulder* 5 mm, ϕ *pin* 2,5 mm dengan tinggi 0,6 mm yang terbuat dari material HSS;
3. Proses pengelasan μ FSSW menggunakan mesin CNC *Milling* Merek EMCO T.U CNC 3A);
4. Kecepatan putaran spindle sebesar 33000 rpm berasal dari mesin bor mactec MT912 yang dihubungkan ke mesin CNC *Milling*;
5. Proses pengelasan μ FSSW memvariasikan waktu tahan (*dwell time*) dan kedalaman las (*pluge depth*);
6. Jenis las yang digunakan adalah las titik/*spot welding*;
7. Pengujian yang dilakukan terhadap hasil lasan antara lain geometri las, sifat mekanik, dan metalografi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dengan dilakukannya penelitian tentang karakterisasi sifat mekanik pada hasil pengelasan material logam aluminium-magnesium dengan proses *Micro Friction Stir Spot Welding* (μ FSSW), adalah:

1. Memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pendidikan yakni tersedianya literasi yang memberikan informasi tentang alternatif proses penyambungan

material logam tak sejenis (*dissimilar welding*) khususnya antara paduan aluminium dengan paduan magnesium.

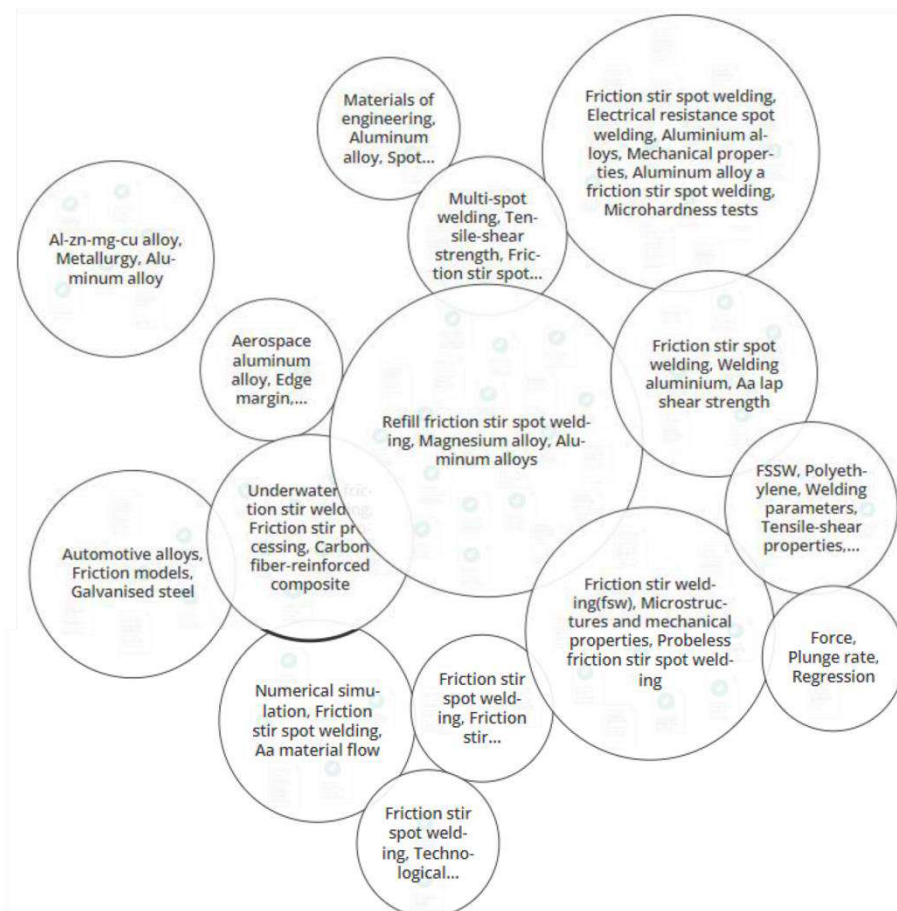
2. Penelitian ini sebagai sarana pengembangan diri bagi peneliti untuk menambah pengetahuan dan keterampilan dalam bidang pengelasan khususnya μ FSSW.

BAB II

KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS PENELITIAN

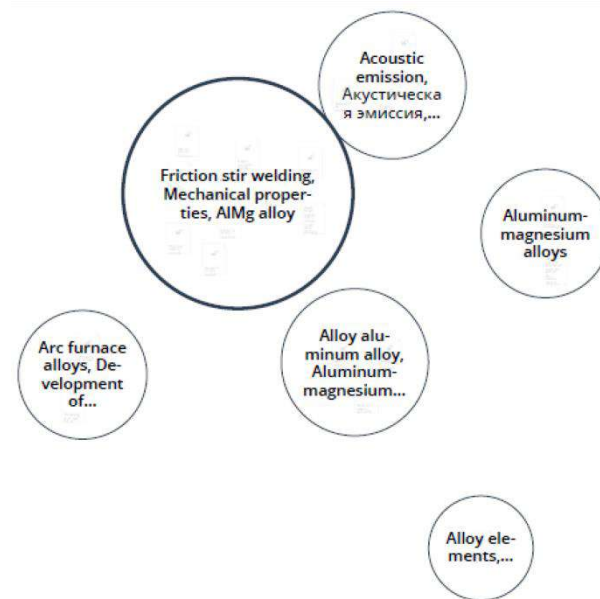
2.1 Kerangka Konseptual

Kerangka konsep dari penelitian ini adalah melihat adanya pengaruh parameter pengelasan μ FSSW terhadap kualitas hasil lasan pada *similar* dan *dissimilar material* aluminium dan magnesium. Dalam penelitian ini akan dipaparkan tentang adanya pengaruh parameter pengelasan μ FSSW terhadap kualitas hasil lasan. Karakterisasi *material* aluminium dan magnesium juga akan dibahas berdasarkan hasil beberapa pengujian. Berdasarkan latar belakang yang sudah disampaikan di bab sebelumnya, pengelasan μ FSSW sangat cocok untuk menyambung *material* seperti aluminium, magnesium, kuningan, baja dengan ketebalan < 5 mm.



Gambar 1. Pemetaan penelitian tentang μ FSSW

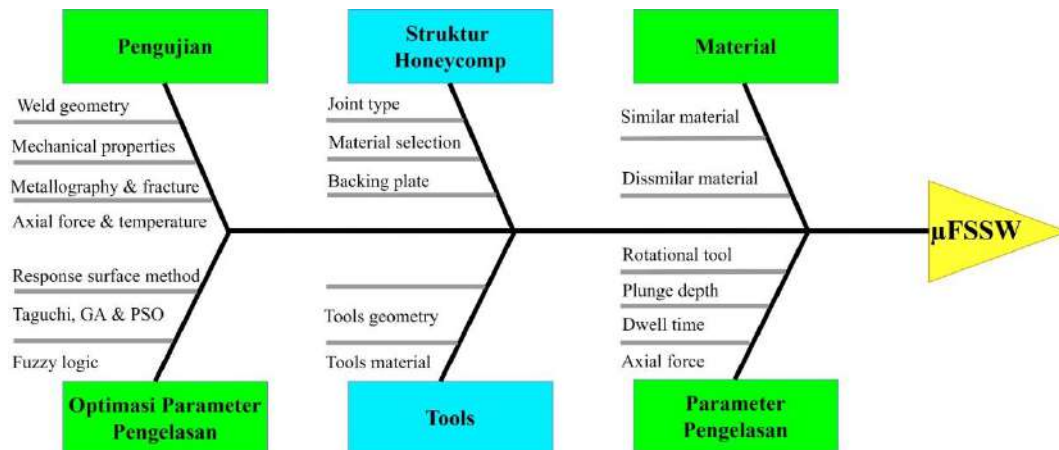
Berdasarkan beberapa penelitian yang sudah dilakukan, dapat dipetakan beberapa penelitian tentang μ FSSW yang ditunjukkan pada Gambar 1. Penelitian ini hanya untuk proses pengelasan μ FSSW dengan berbagai variasi parameter pengelasan dan *material*. Dapat dilihat bahwa pengelasan μ FSSW sudah banyak digunakan untuk beberapa aplikasi seperti di bidang otomotif, aerospace, dll. Dari sini dapat dilihat juga irisan antara setiap penelitian yang sudah dilakukan.



Gambar 2. Pemetaan penelitian tentang μ FSSW pada *material* Al dan Mg

Berdasarkan studi literatur yang sudah dilakukan tentang penelitian μ FSSW, dapat dibuat sebuah diagram *fishbone* terkait ruang lingkup yang bisa divariasikan dalam penelitian μ FSSW. Ruang lingkup dari penelitian tentang μ FSSW ditunjukkan pada Gambar 3 menampilkan *fishbone* diagram. dalam penelitian μ FSSW, setidaknya terdapat 6 parameter besar yang dapat divariasikan dalam penelitian μ FSSW yaitu parameter pengelasan, tool, optimasi parameter pengelasan, *material*, struktur *honeycomp* dan pengujian.

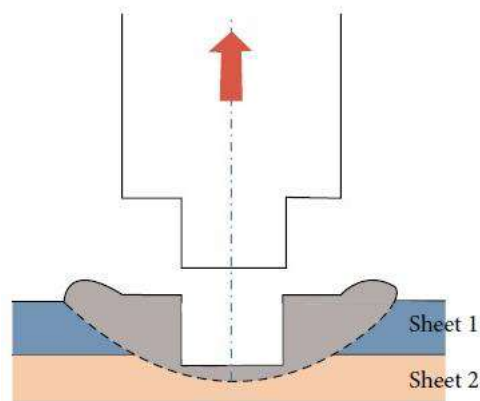
Dalam penelitian ini diambil 4 parameter yang akan digunakan yaitu parameter pengelasan, optimasi parameter pengelasan, *material*, dan pengujian. Selanjutnya dari parameter ini dilakukan eksperimen uji coba dan dilakukan analisis berdasarkan hasil pengujian. Hal ini untuk mengkarakterisasi kualitas lasan μ FSSW.



Gambar 3. Diagram *fishbone* penelitian μ FSSW

Selanjutnya lebih detail lagi pemetaan dilakukan pada penelitian μ FSSW pada *material* Al dan Mg yang ditampilkan pada Gambar 2. Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan, penelitian tentang μ FSSW pada *material* Al dan Mg masih sangat sedikit. Sehingga ini menjadi peluang untuk dilakukan penelitian lebih lanjut lagi. *Material* dengan ketebalan < 1 mm juga masih sangat jarang digunakan dalam penelitian μ FSSW.

Friction stir welding (FSW) merupakan salah satu jenis pengelasan *solid state welding* (SSW) dimana dalam pengelasan FSW terjadi *frictional heat* antara tool dan benda kerja yang akan disambung. proses ini dapat diaplikasikan untuk penyambungan dua material logam maupun non logam tanpa melewati titik lebur benda kerja. selain itu, pengelasan FSW dapat digunakan untuk aplikasi dimana kebutuhan akan perubahan karakteristik dasar dari benda kerja bisa diminimalisir sekecil mungkin (Thomas W.M. *at al.*, 1991). salah satu turunan dari pengelasan FSW adalah *micro friction stir welding* (μ FSSW) dan *micro friction stir spot welding* (μ FSSW) di mana ketebalan material yang digunakan adalah kurang dari 1000 μ m. proses pengelasan μ FSSW dilakukan menggunakan sambungan *lap joint*. pada μ FSSW hanya dilakukan proses pengelasan pada satu titik pengelasan atau yang diketahui sebagai *spot welding* sehingga tidak ada pergerakan secara alur terhadap material. skema pengelasan FSW ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 1. Mekanisme proses FSSW (Mishra R.S. *at al.*,2005

Temperatur maksimal yang diperoleh pada proses pengelasan FSW berdasarkan pengukuran menggunakan *termocouple* adalah diantara 425-500⁰C (Mahoney *at al.*,1998) dan (Mohammadi J. *at al.*,2015). dari penelitian tersebut telah dibuktikan bahwa benda kerja yang bersentuhan langsung dengan pin dapat mencapai temperatur solidus.

pada proses FSW terdapat dua sisi pada pengelasan, yaitu *advancing side* dan *retreading side*. *Advancing side* merupakan material flow yang memiliki temperatur yang lebih tinggi, sedangkan *retreading side* merupakan material flow yang memiliki temperatur lebih rendah, Firouzdor and Kou (2010). selama proses FSW, jarang terbentuk *microvoids* seperti yang dialami proses pengelasan *arc welding*. proses pengelasan *micro friction stir welding* (FSW) ini sering kali digunakan dalam dunia industri manufaktur, otomotif, penerbangan, perkapalan dan lain sebagainya. pada umumnya material logam paduan dapat disambung menggunakan metode pengelasan FSW (Mishra R.S. *at al.*,2005).

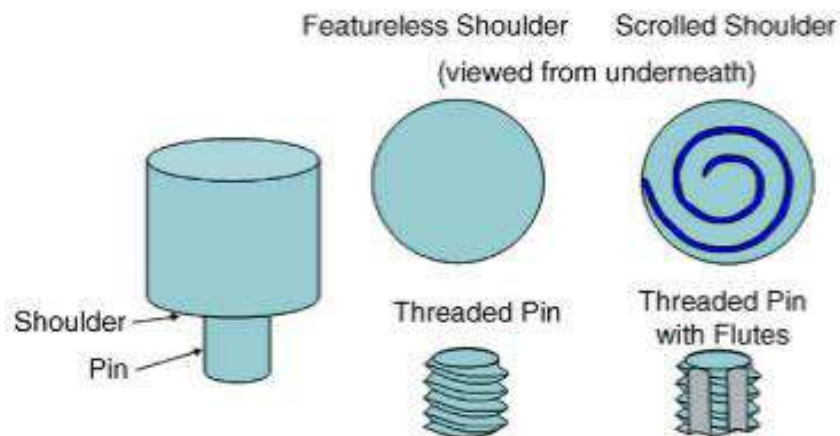
2.1.1 Parameter proses pada μ FSSW

Untuk mendapatkan hasil pengelasan yang optimal dalam pengelasan FSW selain dari pemilihan parameter yang tepat juga dibutuhkan desain pahat yang tepat (Thomas W.M. *at al.*, 1991). parameter – parameter proses pengelasan μ FSSW ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter pengelasan μ FSW (Baskoro A.S. at al.2013).

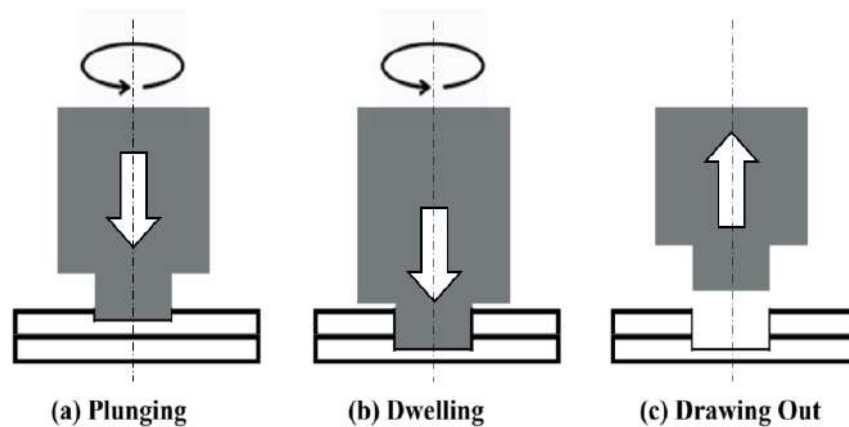
Parameter μ FSW
Tool Rotational Speed
Tool Geometry
Plunge Depth
Tilt Angle
Travel Speed/Feed Rate

Desain pahat merupakan faktor penting sebagai alat yang baik untuk meningkatkan kualitas las dan kecepatan pengelasan maksimum. sangat diharapkan bahwa material pahat (*tool*) adalah cukup kuat, tangguh dan tahan aus, pada suhu las, selanjutnya harus memiliki ketahanan oksidasi yang baik dan konduktivitas termal yang rendah untuk meminimalkan kehilangan panas dan kerusakan termal. Gambar 5 Konfigurasi desain pahat FSW

**Gambar 2.** Konfigurasi desain pahat FSW (Mishra and Ma, 2005)

Geometri pahat memiliki pengaruh yang cukup signifikan dalam mempengaruhi kualitas hasil pengelasan baik dari pemilihan material pahat maupun desain dari pin dan shoulder dari pahat (Baskoro A.S. at al.,2013). dalam pengelasan FSW terdapat dua bagian utama dari sebuah pahat yang digunakan yaitu shoulder dan pin. *Shoulder* berfungsi sebagai penahan material yang dilunakan serta memberi aksi penempaan kebawah. sedangkan pin adalah bagian yang melakukan penetrasi kedalam benda kerja, dimana bagian dari pahat ini

adalah bagian yang mengaduk material atau mengalirkan material yang sudah melunak akibat panas yang dihasilkan, sehingga dapat menciptakan suatu ikatan antar material induk (Baskoro A.S. *et al.*, 2019). saat masuknya pahat mencapai kedalaman (*plunge depth*) yang ditentukan, pahat yang berputar ditahan pada posisi tersebut dengan lama waktu (*dwell time*) yang sudah ditentukan untuk melakukan proses pengadukan. siklus pengelasan μ FSSW ditunjukkan pada Gambar 6 terdapat 3 siklus pada proses pengelasan μ FSSW yaitu:



Gambar 3. Ilustrasi proses μ FSSW

Siklus pengelasan μ FSSW sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 6 adalah sebagai berikut:

1. Gambar 6a) *Plunging* : pahat akan berputar dengan kecepatan *spindle* yang konstan, setelahnya pahat akan turun jatuh mengenai permukaan benda kerja dan terjadi penusukan oleh pahat dalam kedalaman tertentu dalam benda kerja.
2. Gambar 6b) *Dwelling (stirring)* : yakni pahat akan berotasi secara konstan di posisi tersebut untuk waktu yang telah ditentukan, atau biasa disebut *dwell time*.
3. Gambar 6c) *Drawing Out* : pahat akan menuju kembali keatas permukaan dan meninggalkan hole atau profil lasan.

Dalam FSW kedalaman pahat dan lama pengadukan menentukan penimbunan panas, geometri pengelasan, dan sifat mekanikal dari sambungan las tersebut (Firouzdor and Kou., 2009). proses pengelasan μ FSW dua material yang sejenis (*similar*) telah berhasil diinvestigasi oleh Baskoro A.S. *et al* (2013)

(Baskoro et al., 2013, Wang et al., 2018) menggunakan material AA1100 pahat yang digunakan dengan bentuk geometri pin yang berbeda untuk penyambungan material aluminium A1100. selanjutnya dengan material yang sama, Suwarsono et al.,(2019) berhasil meneliti penyambungan material tipis A1100 dengan A1050. Costa M.I. *et al.*, (2015) melakukan proses pengelasan μ FSW pada material dissimilar aluminium A5754 dengan A6082 dan A5182 menggunakan tipe pahat pin cylindrical dan conical, sedangkan Doley J. *et al.*, (2016) telah berhasil menyambungkan dua material aluminium tipis yang berbeda yaitu A5052 dan A6061 menggunakan proses μ FSW.

Selain menyambung dua jenis material aluminium yang berbeda, beberapa peneliti juga telah berhasil menyambungkan aluminium A5083 dengan kuningan Shojaeefard M.H. *et al.*, (2013). sementara penyambungan AA1050 dengan kuningan CuZn30 telah diinvestigasi oleh Esmali A. *at al.*,(2011) dan penyambungan material berbeda antara AA583 dengan tembaga telah diteliti oleh Halvao I. *et al.*, (2010) serta penelitian yang dilakukan oleh Huang Z. And Yanagimoto J. (2015) menginvestigasi pengaruh panas terhadap deformasi plastis pada hasil pengelasan antara aluminium A6061 dengan baja stainless steel SUS304.

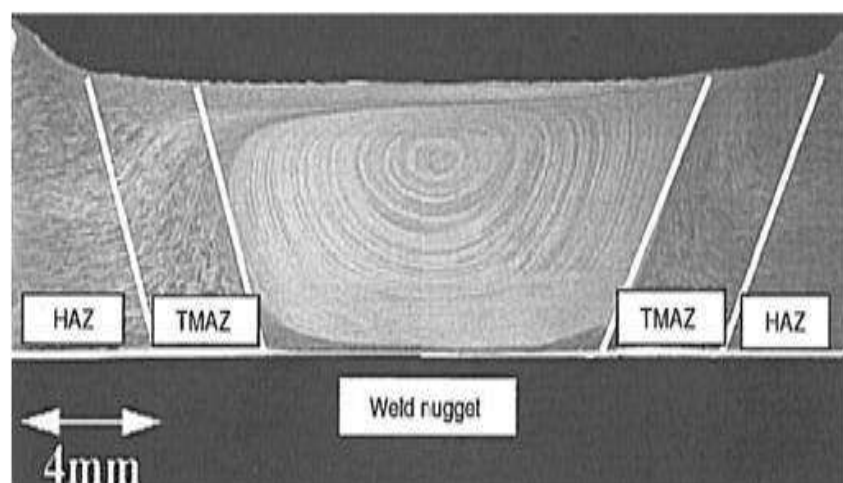
Penelitian yang menggabungkan dua material yang sama (*similar*) telah berhasil dilakukan oleh Wang *et al.*, (2010) telah menginvestigasi proses penyambungan material A1050 menggunakan pengelasan *friction stir spot microwelds*. A.S. Baskoro A.S. *et al.*, (2015) berhasil meneliti proses penyambungan material aluminium A1100 dengan menggunakan tiga pahat yang berbeda menggunakan metode Respon Surface Methodology (RSM) sedangkan Yuan W. *et al.*, (2011) dan Cox C.D. *et al.*, (2014) meneliti tentang pengaruh geometri pahat dan parameter proses pengelasan dua material yang sama yaitu masing-masing A6016 dan A6064. penelitian yang secara spesifik tentang *micro friction stir spot welding* (μ FSSW) dengan menggunakan material berbeda jenis antara paduan aluminium dengan paduan magnesium dengan ketebalan di bawah 1000 μ m masih sangat terbatas.

Penelitian tentang senyawa intermetalik (IMC) telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Qiu dkk (2008) meneliti tentang reaksi intermetalik di

sambungan las material tak sejenis antara Aluminium A5052/SUS304 dan A5052/SPCC terhadap kekuatan tarik sambungan las pada *resistance spot welding* dengan *cover plate*. hasilnya dapat dianalisa bahwa kekuatan tarik sambungan baja dengan aluminium paduan dipengaruhi oleh fraksi reaksi lapisan diskontinyu pada *cover plate*. (Hong-gang., 2012) meneliti tentang pengaruh intermetalik terhadap kekuatan tarik geser pada interface sambungan las material tak sejenis antara aluminium paduan dengan baja karbon rendah dengan *filler* pada pengelasan logam GTAW. (Taban dkk., 2010) menyambung material AL 6061 dan AISI 1018 untuk mempelajari sifat dan karakteristik stuktur mikro dengan menggunakan metode FSW, hasilnya menyatakan bahwa lapisan intermetalalik yang terbentuk dapat mempengaruhi kekuatan sambungan. penelitian tersebut menerangkan tentang pengaruh reaksi intermetalik di sambungan las dengan beberapa metode pengelasan yang berbeda. Jenis dan morfologi reaksi produk yang terbentuk pada sambungan las dipengaruhi oleh kombinasi bahan atau metode pengelasan yang digunakan (Qiu dkk., 2010). dengan demikian pemahaman tentang karakteristik reaksi intermetalik di sambungan las sangat penting untuk di kaji lebih dalam.

2.1.2 Daerah-daerah pengelasan μ FSSW

Berikut ini merupakan daerah – daerah pengelasan FSSW ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 4. Daerah-daerah pengelasan FSW (Ahmed and Saha.,2018)

1) Base Metal (Unaffected material)

Bagian material yang letaknya jauh dari wilayah las dan belum berubah strukturnya. Pada bagian ini mungkin sudah mengalami siklus termal hasil dari proses pengelasan akan tetapi tidak terpengaruh oleh panas baik dalam hal mikro ataupun sifat mekaniknya.

2) *Heat Affected Zone (HAZ)*

Wilayah yang terletak lebih dekat ke bagian pusat pengelasan apabila dibandingkan dengan *base metal*. Pada bagian ini telah mengalami siklus termal selama proses pengelasan dan sudah terjadi perubahan secara mikro atau sifat mekanik, akan tetapi tidak terjadi deformasi plastis di daerah ini.

3) *Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)*

Di daerah ini, telah terjadi deformasi plastis dan panas yang diakibatkan gesekan antara pahat dengan benda kerja telah memberi pengaruh pada material. Untuk kasus aluminium, dimungkinkan untuk mendapatkan regangan plastis yang signifikan tanpa rekristalisasi, dan terlihat batas yang cukup jelas antara TMAZ dan NZ.

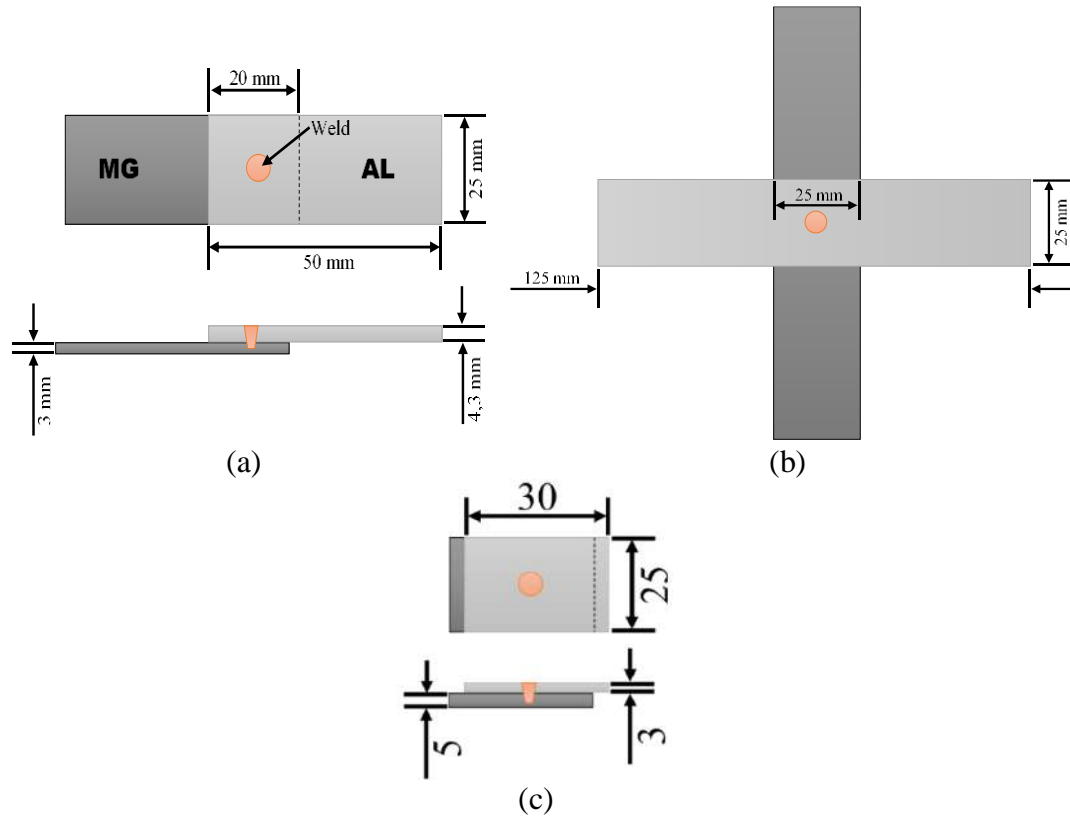
4) *Stir Zone (SZ)/Nugger Zone (NZ)*

Wilayah yang sepenuhnya terjadi rekristalisasi karena pada daerah ini merupakan daerah yang bersentuhan langsung pada bagian material dan *tool*. Ukuran butir dalam SZ terlihat secara jelas sangat berbeda dan lebih kecil daripada butir yang ada pada *base metal*. Nilai kekerasan pada TMAZ relative lebih tinggi daripada nilai kekerasan pada HAZ. Hal ini disebabkan karena pada daerah TMAZ, ukuran butir yang dihasilkan di daerah TMAZ akibat dari rekristalisasi lebih kecil daripada di HAZ. Semakin rendah kecepatan pengelasan, akan menyebabkan temperatur semakin tinggi, sehingga ukuran butir yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini dibuktikan dari nilai kekerasan yang rendah (*Ahmed and Saha.,2018*).

2.1.3 Geometri las μ FSSW

Pengujian geometri las pada penelitian μ FSSW dapat dilihat dari diameter nugget las yang terbentuk (diameter pin dan diameter *shoulder*), *plunge depth* terukur, dan luas TMAZ terukur. ada tiga sampel benda uji dari hasil las μ FSSW

yang untuk mendapatkan data geometri las masing-masing ditunjukkan pada Gambar 8 setiap spesimen direplikasi sebanyak tiga kali untuk setiap variasi parameter.



Gambar 5. a) spesimen uji tarik geser; b) spesimen uji tarik silang; dan c) spesimen uji metalografi

Kualitas suatu produk dari hasil proses *Friction stir spot welding* (FSSW) didefinisikan oleh ukuran diameter nugget dan nilai uji tariknya. parameter yang berpengaruh terhadap kualitas FSSW ini diantaranya adalah *dwelt time* dan *plunge depth* (Baskoro A.S. *at al.*, 2020). jika pemilihan parameter tidak tepat maka, akan terjadi sebuah kegagalan/cacat pada daerah lasan.

Proses pengukuran untuk mengetahui geometri lasan, yakni dimulai mengetahui diameter nugget, kedalaman las, dan profil lasan. pengujian geometri las dalam penelitian ini, dilakukan dengan 2 alat uji yang berbeda, yaitu *Dino-Lite* dan *Surfcom*. *Dino-Lite* digunakan untuk mengukur diameter nugget las dan profil kontur lasan. sedangkan *Surfcom* digunakan untuk mengukur kedalaman las dan profil kontur lasan. Gambar 9 merupakan mikroskop digital *Dino-Lite* yang digunakan untuk mengukur diameter nugget las dan profil kontur lasan.



Gambar 6. Digital mikroskop (Dino-Lite)

Dino-lite merupakan mikroskop digital USB, mikroskop digital berdaya rendah yang terhubung ke komputer. Dino-lite dilengkapi dengan lensa makro dan juga lampu LED *built-in* yang terletak di sebelah lensa. Cahaya LED berguna untuk dipantulkan ke sampel dan kemudian ditangkap oleh lensa kamera. Lensa kamera yang terpasang pada Dino-lite langsung terhubung dengan port USB komputer, sehingga tidak diperlukan lagi *eyepieces* yang biasa terdapat pada mikroskop optik konvensional. Mikroskop digital USB biasanya dapat bekerja dengan perbesaran 1x hingga 200x tanpa menggunakan tambahan *eyepieces* dimana hal ini membuat Mikroskop USB mempunyai daya saing dalam sisi ekonomis dibandingkan dengan mikroskop optik konvensional. Dalam penelitian ini, Dino-Lite digunakan untuk proses pengambilan data terkait diameter sambungan dan profil kontur yang terbentuk akibat proses pengelasan. Sebelum melakukan pengukuran, dilakukan proses kalibrasi pada Dino-Lite. Gambar 10 menunjukkan contoh hasil pengukuran diameter nugget las dilihat dari atas dan belakang.



(a)



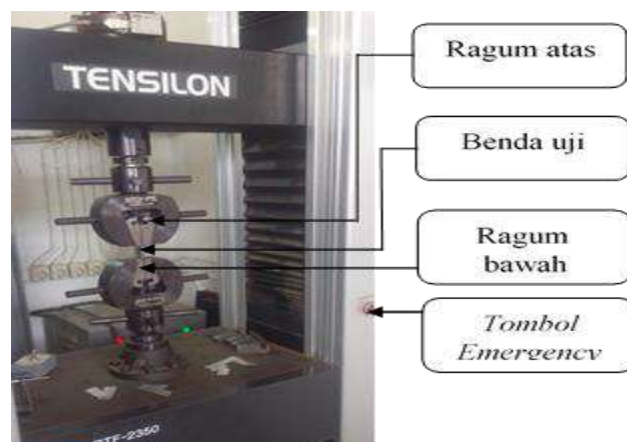
(b)

Gambar 7. Hasil pengukuran profil diameter nugget las (a) tampak atas dan (b) tampak belakang

2.1.4 Pengujian sifat mekanik (uji beban gaya geser dan gaya silang)

Salah satu cara untuk mengetahui besaran sifat mekanik dari logam adalah dengan uji tarik. sifat mekanik yang dapat diketahui adalah kekuatan dan elastisitas dari logam tersebut. uji tarik yang dilakukan dalam penelitian ini yakni terbagi menjadi 2 yaitu, *uji tarik geser/tensile test* (TT) dan tarik silang/*cross tensile test* (CTT). Pengujian tarik pada CTT dilakukan untuk mengetahui kekuatan spesimen secara pembenan lateral sedangkan pengujian pada TT dilakukan untuk mengetahui kekuatan spesimen secara pembenan aksial.

Proses uji Tarik CTT dan TT sudah umum dilakukan dalam penelitian terkait FSW, FSSW maupun μ FSSW. Seperti yang dilakukan Zhang Z. (2011) yang menggunakan metode TT dan CTT untuk menemukan pengaruh parameter pengelasan terhadap struktur mikro dan sifat mekanik pada FSSW dengan menggunakan paduan aluminium 5052, melalui uji TT dan CTT pada penelitian tersebut didapatkan beban yang mampu ditahan oleh setiap spesimen yang di uji. Penelitian berikutnya oleh Badarinarayan H. *at al.*, (2009) juga menggunakan metode uji TT dan CTT untuk mengetahui pengaruh efek geometri pahat pada kekuatan statik dari FSSW menggunakan paduan aluminium, beban yang mampu ditahan oleh spesimen pun merupakan inti dari uji ini. Selanjutnya Tozaki Y. *at al.*, (2007) juga menggunakan metode tarik CTT dan TT pada penelitian untuk pengaruh geometri pahat terhadap struktur mikro dan kekuatan statik pada FSSW menggunakan paduan aluminium. berikut adalah mesin uji tarik yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 11.

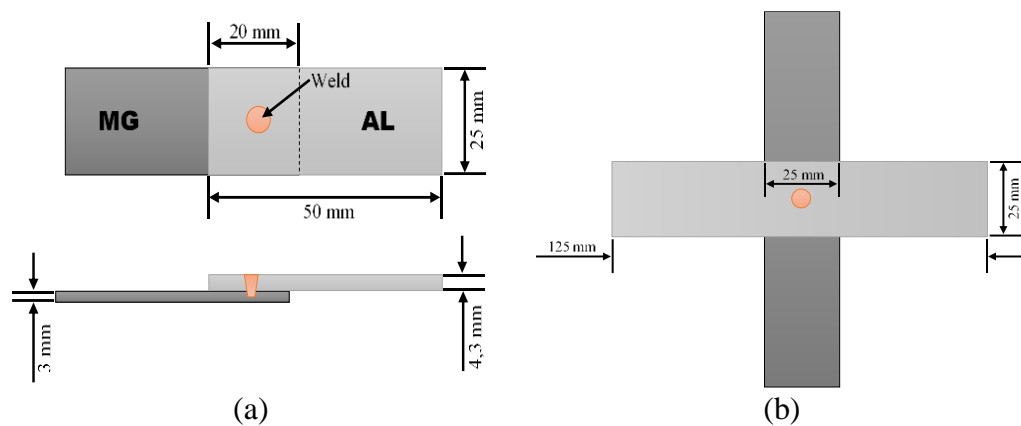


Gambar 8. Mesin uji tarik Tensilon A&D

Berikut adalah langkah-langkah yang perlu dilakukan dalam proses uji tarik pada hasil lasan:

1. Menyalakan mesin uji geser Tensilon A&D dengan cara memutar tombol *emergency* dan menekan tombol *power* dari komputer.
2. Membuka aplikasi *software* yang terintegrasi dengan mesin Tensilon A&D.
3. *Setting* kecepatan tarik dengan nilai 5 mm/menit.
4. Meletakkan spesimen pengujian pada pencengkram mesin dan memastikan spesimen telah tercengkram dengan baik.
5. Melakukan kalibrasi posisi dan *load*.
6. Klik *start*, kemudian proses pengujian dimulai, dimana spesimen terus ditarik sampai putus.
7. Nilai hasil pengujian geser terekam dalam bentuk tabel *load* dan *displacement*, yang kemudian dapat diolah.

Berikut merupakan dimensi spesimen uji tarik yang dibuat dalam penelitian ini sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.

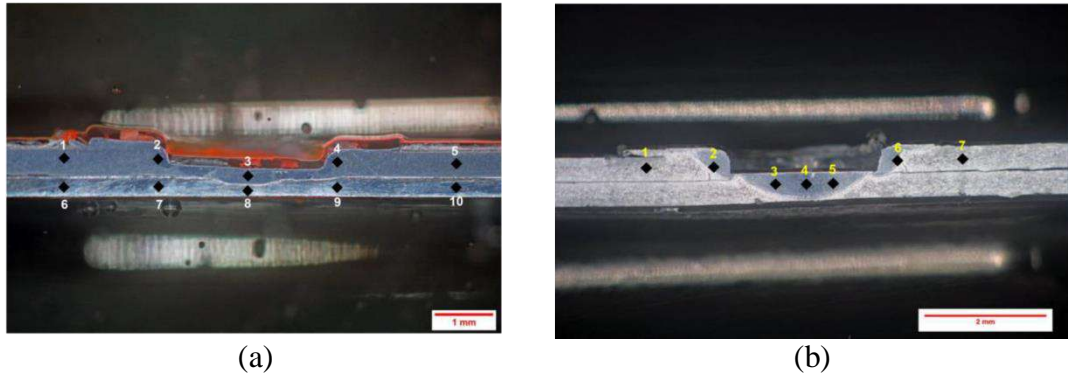


Gambar 9. dimensi spesimen untuk uji (a) beban geser; (b) beban silang

2.1.5 Pengujian sifat mekanik (uji *microhardness vickers*)

Pengambilan titik uji kekerasan untuk *dissimilar material* AA1100-AZ31B ditunjukkan pada Gambar 13a. Dimana terdapat 5 titik uji pada plat atas (aluminium) dan 5 titik uji pada plat bawah (magnesium), sehingga total pengujian kekerasan mikro ada 10 titik uji. Pengambilan titik uji kekerasan untuk *similar material* ditunjukkan pada Gambar 13b. Dimana terdapat 7 titik uji pada

plat aluminium, 2 titik didaerah HAZ, 2 titik didaerah samping SZ dan 3 titik didaerah center SZ.



Gambar 10. Titik uji kekerasan untuk a) *dissimilar material* dan b) *similar material*

2.1.6 Pengujian metalografi (uji struktur makro dan struktur mikro)

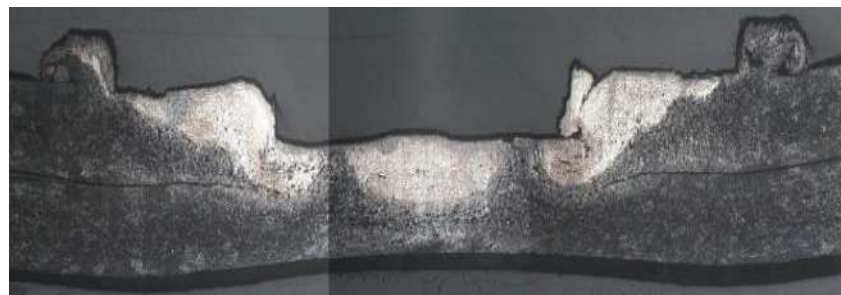
Pengujian struktur makro dilakukan dengan berbagai prosedur sebelum gambar makro bisa diambil. prosedurnya meliputi pemotongan hasil lasan secara melintang (*cross-section*), kemudian hasil potongan di *mounting* menggunakan resin. setelah itu dilakukan proses amplas/*grinding* dari berbagai kekasaran amplas hingga halus dan selanjutnya di etsa menggunakan larutan 5-10% sodium hidroksida (NaOH), 75% volume asam nitrat (HNO₃), 25% HF pada temperature kamar tertentu untuk memunculkan butirannya.

Observasi dilakukan dengan menggunakan bantuan alat mikroskop. Mikroskop yang digunakan pada penelitian ini Euromex Oxion Inverso seperti ditunjukkan pada Gambar 14 pada penelitian ini, mikroskop digunakan untuk melihat struktur makro dari bentangan hasil las μ FSSW. nantinya struktur makro akan diambil melalui bantuan software *Image Focus 4*. sama halnya seperti pada Dino-Lite, penulis tidak perlu melihat hasil mikroskop melalui lensa okuler pada mikroskop, namun bisa melihat hasilnya pada monitor layar berkat bantuan software *Image Focus 4*.



Gambar 11. Proses observasi struktur makro dan struktur mikro dengan mikroskop Euromax Oxion Inverso

Sebelum digunakan, mikroskop harus disesuaikan terlebih dahulu lensa yang akan digunakan diatur perbesaran serta dilakukan pengaturan fokus dan pencahayaan agar hasil lebih maksimal. Gambar 15 menunjukkan contoh struktur makro dan struktur mikro yang dapat diamati.



(a)



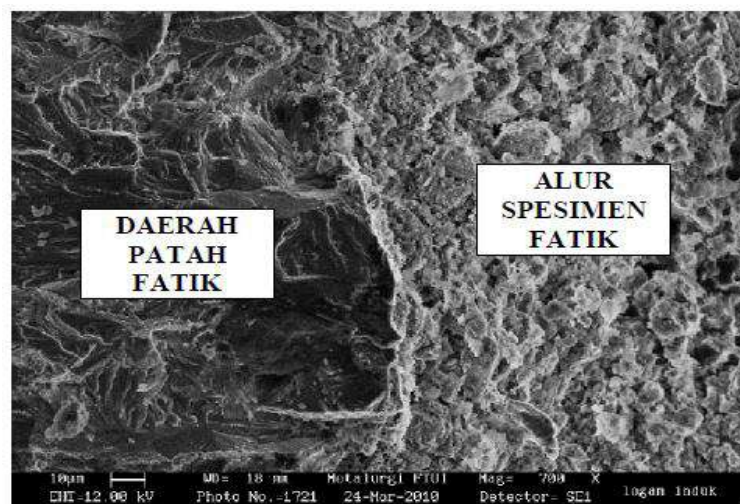
(b)

Gambar 12. Hasil pengamatan (a) struktur makro dan (b) struktur mikro menggunakan mikroskop optic

2.1.7 Pengujian *fracture*

Pengujian patahan (*fracture*) dilakukan setelah dilakukan pengujian *tensile shear load* dan *cross tensile load*, permukaan patahan diamati menggunakan

metode *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengujian dilakukan pada kedua hasil patahan uji tarik. Gambar 16 menunjukkan contoh hasil uji SEM pada patahan uji tarik.

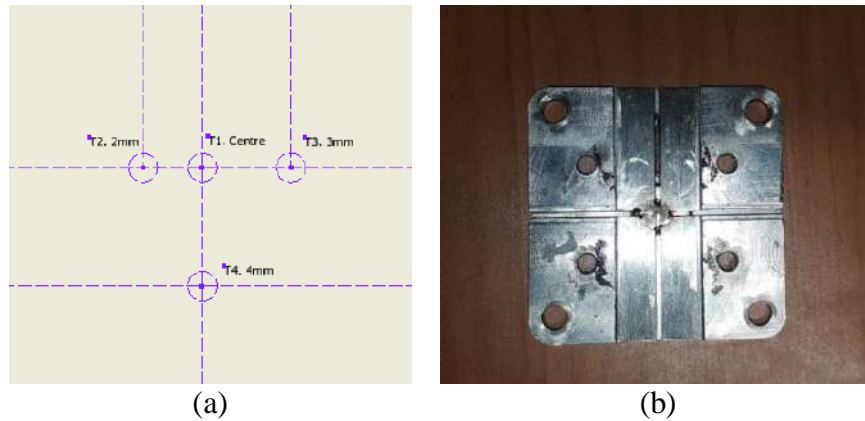


Gambar 13. Hasil foto SEM pada daerah patahan dengan perbesaran 700x

2.1.8 Distribusi temperatur

Friction stir welding (FSW) merupakan metode penyambungan material yang memanfaatkan panas yang ditimbulkan antara gesekan kedua material yang sama maupun berbeda. keistimewaan FSW dapat menyambung material yang berbeda Thomas W.M. *at al.*,(1991). Penelitian ini menggunakan beberapa sensor untuk mengetahui fenomena distribusi temperature yang terjadi saat proses pengelasan μ FSSW. sensor termocouple terletak pada titik tengah pengelasan (centre of weld), 2 mm dari center, 3 mm dari center dan 4 mm dari center pengelasan dimana pada titik center dan jarak 2 mm dari center menunjukkan daerah *Thermomechanical Affected Zone* (TMAZ), sedangkan titik 3 mm dan 4 mm dari center menunjukkan daerah *Heat Affected Zone* (HAZ).

Pengujian karakterisasi pengaruh parameter proses terhadap distribusi temperatur pada plat aluminium, dilakukan dengan memasang sensor temperatur, yaitu Thermocouple Type-K wire \varnothing 0.2 mm. Pemasangan termokopel pada plat aluminium seperti pada Gambar 17.

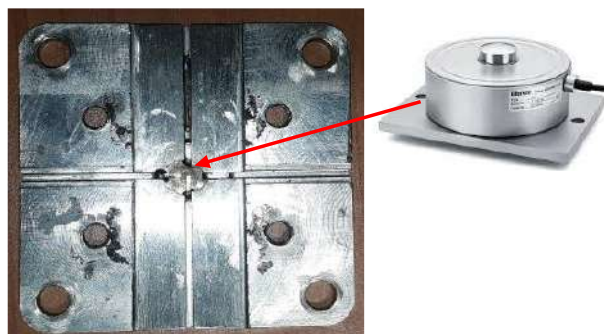


Gambar 14. a) Posisi termokopel pada spesimen dan b) spesimen aluminium

Untuk memperkirakan temperatur pada permukaan kontak antara pahat dengan material, maka dilakukan pengujian temperatur pada pusat sumbu pahat pada kedalaman 0,4 mm dari permukaan. Keempat termokopel disisipkan pada permukaan antara spesimen dengan permukaan dibawah plat aluminium, salah satu termokopel diletakkan di sumbu pahat. Distribusi lokasi keempat termokopel, dapat dilihat pada Gambar 17.

2.1.9 Gaya aksial

Pengukuran gaya aksial dilakukan menggunakan compression load cell sensor. Compression load cell ini diletakkan dibawah anvil sesuai Gambar 18. Compression load cell ini memiliki kapasitas maksimum 100 kg. sensor ini dihubungkan ke arduino seperti halnya sensor termokopel untuk data akuisisi. Selain itu ditambahkan juga optical sensor untuk mengetahui kecepatan putar tool selama proses pengelasan. Gaya aksial (gaya kebawah) diperlukan untuk mempertahankan posisi pahat pada permukaan atau dibawah permukaan material. Beberapa FSW, gaya beroperasi di bawah kontrol tetapi dalam banyak kasus, posisi vertikal dari pahat ini berubah-ubah sehingga gaya akan bervariasi selama pengelasan.



Gambar 15. Posisi compression load cell

Balassubramanian N. *at al.*,(2011), menyatakan bahwa posisi gaya aksial yang bekerja pada pahat akan membantu dalam memprediksi terjadinya aliran material (*channel*) di zona nugget. ketika aliran material berada di zona nugget, gaya resultan yang bekerja pada pin berada di wilayah antara *retreating side* dan *trailing edge*. Lorrain O. *at al.*,(2010), menyatakan bahwa penampang makro dari sambungan las menunjukkan bahwa ketebalan zona dipengaruhi oleh rotasi *shoulder*. jika zona lebih tebal mengakibatkan peningkatkan gaya aksial (*Z force*) dan kecepatan rotasi silinder pin. namun penelitian yang sama menunjukkan bahwa penggunaan pin kerucut dengan tiga sisi datar, akan mengubah aliran material yang dihasilkan oleh *shoulder* dan pin, sehingga menciptakan lebih banyak variasi dari kecepatan material dibanding dengan pin silindris.

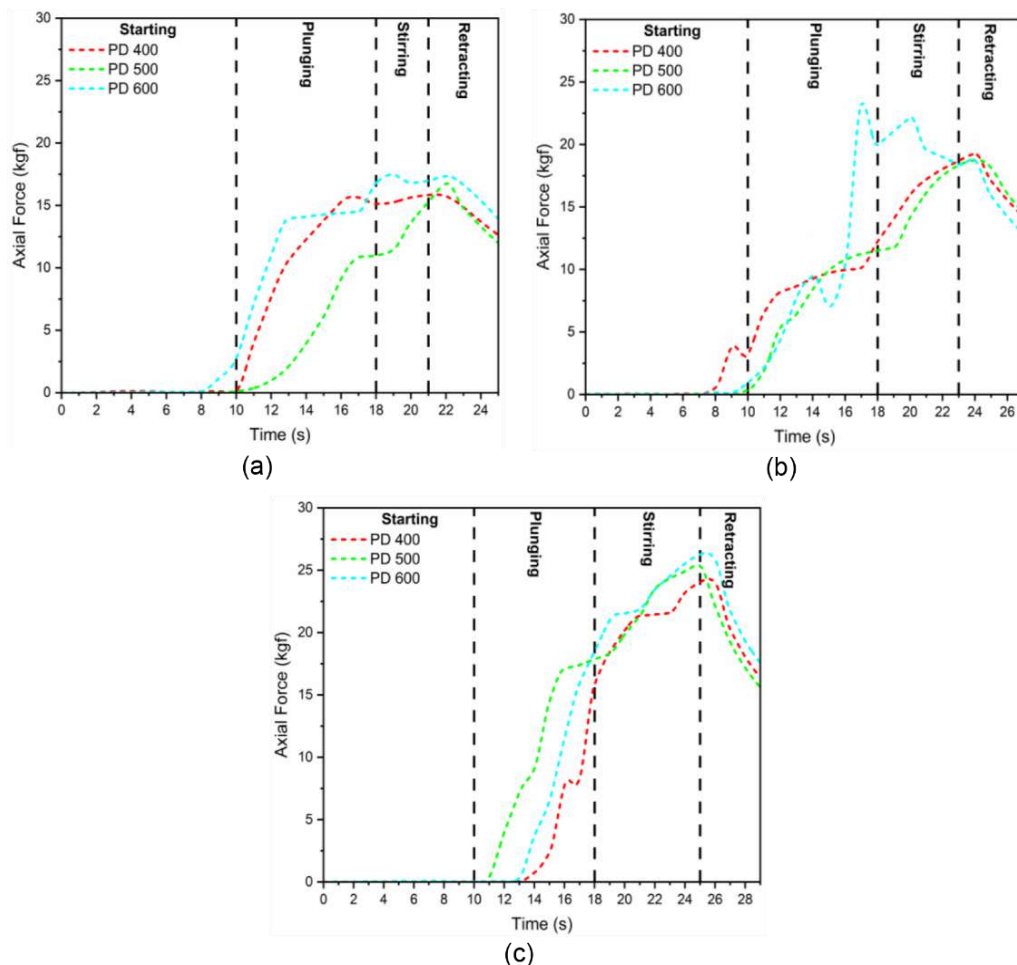
Pengukuran gaya aksial (*axial force*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah *load cell compression force sensor* dengan kapasitas maksimum 50 kg. sensor ini kemudian dihubungkan ke modul NI dan dijalankan dengan program LabView, hasil data kemudian disimpan dalam computer. Tabel 2.2 menyajikan data gaya aksial maksimum dengan beberapa variasi parameter

Tabel 2. Gaya aksial maksimum dengan beberapa variasi parameter

No	Dwell time (milidetik)	Plunge depth (mikron)	Maksimum gaya aksial (kgf)
1	300	400	16.22
2		500	16.75
3		600	17.47
4	500	400	19.25
5		500	20.45
6		600	23.30
7	700	400	24.66
8		500	25.44
9		600	26.72

Tabel 2 menunjukkan gaya aksial maksimum pada setiap variasi parameter. gaya aksial maksimum berkisar dari 16,22 kgf hingga 26,72 kgf. pada parameter *dwell time* 700 ms dan *plunge depth* 600 mikron menghasilkan gaya aksial terbesar yaitu 26,72 kgf.

Data yang dihasilkan dari pengukuran gaya aksial (*axial force*) selanjutnya diplot dalam grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 19 merupakan hasil distribusi gaya aksial pada dissimilar material Al-Mg.



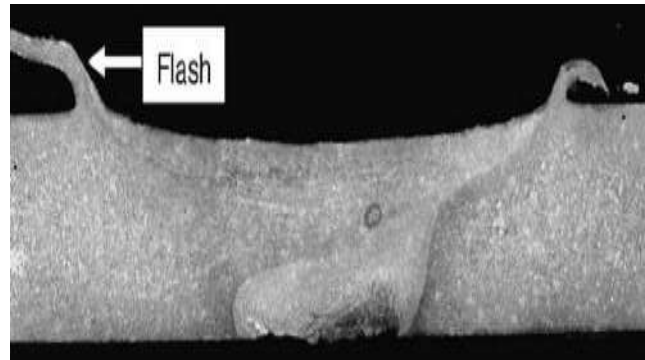
Gambar 16. Distribusi gaya aksial pada dissimilar Al-Mg dengan dwell time: a) 300 milidetik, b) 500 milidetik dan c) 700 milidetik

2.1.10 Cacat pada lasan μ FSSW

Welding defect atau cacat pada pengelasan merupakan hasil pengelasan yang tidak memenuhi syarat yang sudah dituliskan di standar (Contoh: *ASME IX*, *AWS*, *API*, *ASTM*). penyebab dari cacat pengelasan ada beberapa faktor, antara lain mungkin karena prosedur pengelasan yang salah, karena persiapan sesaat sebelum pengelasan yang tidak/kurang memadai, atau karena peralatan dan bahan habis pakai (*consumable material*) yang tidak sesuai dengan standar yang ada.

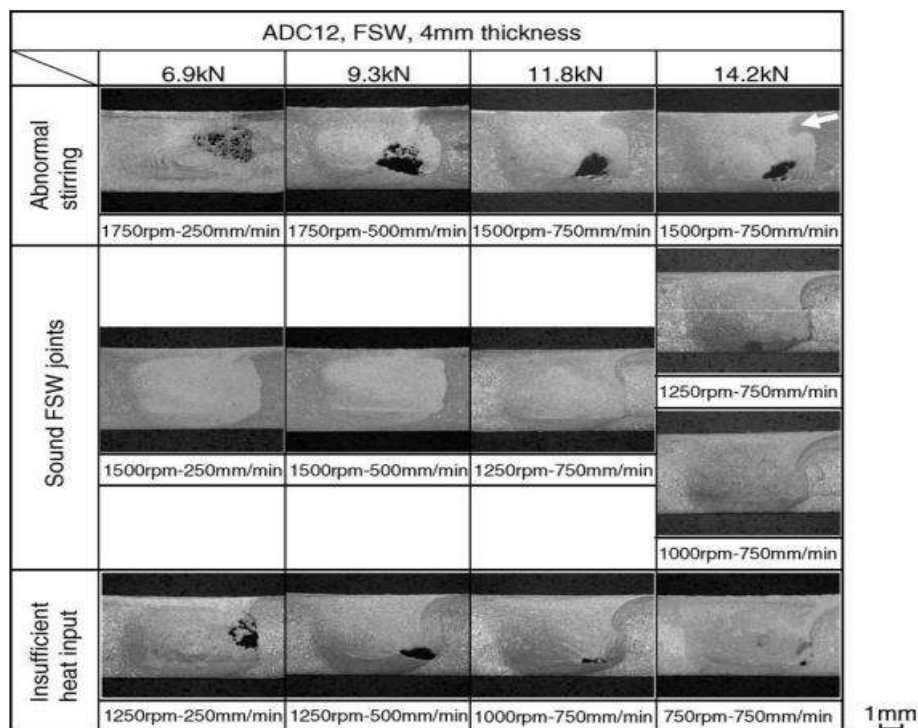
Jenis cacat pada las ada beberapa tipe yaitu, cacat las internal dan cacat las visual. cacat las internal ini adalah cacat las yang berada di dalam hasil lasan dan dapat dilihat dengan perbesaran mikroskop. sedangkan cacat las visual adalah jenis cacat yang dapat dilihat dengan kasat mata. cara untuk mengidentifikasi cacat pengelasan internal, maka diperlukan alat uji seperti *Ultrasonic Test* dan *Radiography Test* untuk pengujian las yang tidak merusak, sedangkan untuk uji

yang merusak spesimen dapat dilakukan uji bending atau uji makro. untuk dapat mengidentifikasi jenis cacat pengelasan visual dapat dilakukan pengujian *Penetrant Test* dan *Magnetic Test*. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan oleh (Lee C.Y. *at al.*,2008) terkait cacat pengelasan pada FSW, terdapat tiga jenis cacat yang dapat terbentuk pada pengelasan Aluminium *Die Cast*. Jenis pertama adalah massa *flash* yang besar karena masukan panas berlebih (lihat Gambar 20).



Gambar 17. Flash yang besar akibat panas berlebih (Lee C.Y. *at al.*,2008)

Jenis kedua adalah cacat seperti rongga atau alur yang disebabkan oleh masukan panas yang tidak mencukupi. jenis ketiga adalah lubang atau rongga (*cavity*) akibat pengadukan atau *stirring* yang tidak normal ditunjukkan pada Gambar 21.



Gambar 18. Contoh cacat las dari jenis 2 dan 3 (Lee C.Y. *at al.*,2008)

2.1.11 Perhitungan tegangan

Pendekatan perhitungan dari tegangan (*stress*) dilakukan dengan membandingkan tegangan tarik maksimum dalam satuan N dengan luas area nugget dalam satuan mm². dalam penelitian ini terdapat dua jenis tegangan/*stress* yaitu tegangan silang (*cross stress*) dan tegangan geser (*shear stress*). Rumus yang digunakan untuk menghitung kedua tegangan ini adalah :

$$\sigma_{cross} = \frac{F_{cross}}{A_{cross}} \quad (1)$$

$$\sigma_{shear} = \frac{F_{shear}}{A_{shear}} \quad (2)$$

Di mana:

σ_{shear} = Tegangan geser

F_{shear} = Gaya geser

A_{shear} = Luas area nugget pada pada spesimen uji tarik geser

σ_{cross} = Tegangan silang

F_{shear} = Gaya silang

A_{cross} = Luas area nugget pada pada spesimen uji tarik silang

dengan menggunakan rumus tersebut diatas maka, diperoleh data tegangan baik tegangan geser (*shear stress*) dan tegangan silang (*cross stress*) pada penelitian *micro friction stir spot welding* (μ FSSW).

2.1.12 Gaya-gaya pada μ FSSW

Perbaikan dalam desain pahat telah terbukti menyebabkan peningkatan substansial dalam produktivitas dan kualitas. TWI telah mengembangkan pahat khusus dirancang untuk meningkatkan kedalaman penetrasi dan berhasil meningkatkan ketebalan plat yang dapat dilas. Contohnya adalah desain 'lingkaran' (*whorl*) yang menggunakan *pin* berbentuk lonjong dengan pitch ulir yang bervariasi dalam rangka untuk meningkatkan aliran material adukan ke bawah. Dalam rangka untuk mencegah kerusakan pahat dan untuk meminimalkan keausan yang berlebihan dan kerusakan pada pahat dan mesin terkait, siklus pengelasan harus dimodifikasi sehingga gaya yang bekerja pada pahat serendah mungkin, dan perubahan mendadak dihindari. Dalam rangka untuk mencari kombinasi terbaik dari parameter pengelasan ada kemungkinan bahwa kompromi

harus dicapai, karena kondisi yang mendukung gaya rendah (misalnya masukan panas tinggi, kecepatan pengelasan diturunkan) mungkin tidak diinginkan dari sudut pandang produktivitas dan sifat hasil las. Selama proses pengelasan beberapa gaya timbul pada pahat (Kim et al., 2010):

1. Gaya aksial (gaya ke bawah) diperlukan untuk mempertahankan posisi pahat pada permukaan atau di bawah permukaan material. Beberapa FSW, gaya beroperasi di bawah kontrol tetapi dalam banyak kasus, posisi vertikal dari pahat ini berubah-ubah sehingga gaya akan bervariasi selama pengelasan.
2. Gaya tengensial, memiliki arah sejajar dengan gerak pahat dan positif dalam arah lintas pahat. Karena kekuatan ini muncul sebagai akibat dari perlawanan dari bahan terhadap gerakan pahat itu, maka diharapkan kekuatan ini akan menurun ketika suhu material di sekitar pahat ini meningkat.
3. Gaya lateral mungkin bekerja tegak lurus terhadap arah pahat melintas dan didefinisikan di sini sebagai positif terhadap sisi gerak maju las.
4. Torsi yang diperlukan untuk memutar pahat, yang besarnya akan tergantung pada gaya ke bawah dan koefisien gesekan (sliding friction) dan kekuatan gesek aliran material di sekitar pahat (sticking friction).

Beberapa peneliti setuju bahwa bentuk perkakas dan kecepatan perkakas akan mempengaruhi kualitas las, khususnya aliran material. Kumar (Kumar and Kailas, 2008) mengatakan, ada dua jenis aliran material, yaitu *shoulder-driven* dan *pin-driven* aliran material. *Pin* memindahkan material lapisan demi lapis, sementara *shoulder* memindahkan material seperti bulk. Balasubramanian dkk. (Balasubramanian et al., 2011), menyatakan bahwa posisi gaya balik yang bekerja pada pahat akan membantu dalam memprediksi terjadinya saluran-saluran (*channel*) di nugget. Ketika saluran yang ada di zona nugget, gaya resultan yang bekerja pada *pin* di wilayah antara retreating side dan trailing edge. Lorrain (Lorrain et al., 2010), menyatakan bahwa penampang makro dari sambungan las menunjukkan bahwa ketebalan zona dipengaruhi oleh rotasi *shoulder*. Zona lebih tebal mengakibatkan meningkatkan gaya benam/aksial (*Zforce*) dan kecepatan rotasi silinder *pin*. Pada *pin* kerucut (dengan tiga sisi rata), tiga sisi datar mengubah aliran material yang dihasilkan oleh *shoulder* dan *pin* menciptakan lebih banyak variasi dari kecepatan material dibanding dengan *pin* silindris.

Selanjutnya adalah ukuran dari tool, diameter *shoulder*, diameter *pin*, panjang *pin* dan panjang pahat secara keseluruhan diatur sesuai dengan proses yang diinginkan yaitu ketebalan benda kerja, kemiringan pahat pada saat proses, kekuatan sambungan dan *clearence* (lebar celah) antar benda kerja.

2.1.13 Pembangkitan Energi Panas pada FSW

Pembangkitan kalor/panas (*heat generation*) pada proses FSW adalah sebanding dengan masukan daya kerja pahat dikurangi kehilangan kalor. Masalah utama dalam pembangkitan kalor adalah jenis kontak antara permukaan pahat dengan permukaan material. Umumnya menggunakan pendekatan Hukum Gesekan Coulomb (*Coulomb friction law*), untuk menggambarkan gaya gesek antara permukaan pahat dengan permukaan material. Persamaan Tegangan Geser yang umum, adalah (Lohwasser and Chen, 2009):

$$\tau_{friction} = \mu \cdot p \quad (1)$$

Dimana μ adalah koefisien gesek dan p adalah tekanan kontak (normal). Pada kondisi stick, pembangkitan kalor berasal dari deformasi plastis material, Tier (Tier et al., 2013) mengasumsikan hubungan tegangan geser (*shear stress*) maksimum terhadap tegangan luluh (*yielding*) dinyatakan dengan:

$$\tau = \frac{\sigma}{3} \quad (2)$$

Dimana v workpiece adalah kecepatan material benda kerja, dan v_{Tool} adalah kecepatan pahat (yang diperoleh dari ωr , dimana ω =kecepatan angular dan r =radius pahat). Secara garis besar, pada kondisi sliding menghasilkan kalor karena gesekan, dan pada kondisi sticking membangkitkan kalor karena deformasi plastis. Menurut Mishra dkk. (Mishra and Ma, 2005b), perbandingan pembangkitan kalor, berdasarkan luas kontak, pembangkitan kalor dari *shoulder:pin side:pin tip* = 0.85:0.11:0.04. Sehingga pembangkitan kalor dari *pin* relatif kecil, bahkan pada plat tipis bisa diabaikan. Energi pembangkitan kalor (*heat generation*, QFS) sebanding dengan energy mekanik (PTool) (Cui et al., 2010):

$$Q_{FS} = P_{Tool} = M \cdot \omega + F_x \cdot v = M \cdot \omega \quad (3)$$

Dimana M adalah torsi dan ω adalah kecepatan putar sumbu pahat dan v kecepatan gerak maju pahat (*transversal*). Biasanya gaya gerak maju (F_x) pahat sangat kecil (< 10%) dibanding gaya-gaya total. Untuk mengetahui M , QFS dapat

dinyatakan dengan energy spesifik (E_s), yang mana pembangkitan panas dapat ditulis:

$$E_s = \frac{Q_{FS}}{v} = M \frac{\omega}{v} \quad (4)$$

Umumnya peningkatan temperatur pada material selama proses FSW dapat diprediksi dengan harga M dan Q_{FS} , walaupun untuk lebih teliti harus menghitung energi kalor yang hilang ke pahat, material, anvil dan udara sekitar.

Torsi yang timbul pada proses FSW, diturunkan dari luas permukaan pahat dan gaya gesek antara material dengan pahat. Secara umum, persamaan torsi yang terjadi pada pahat:

$$M = M_{shoulder} + M_{pinsurface} + M_{pinbottom} \quad (5)$$

Dengan asumsi permukaan pahat, maka persamaan torsi menjadi,

$$M = \frac{1}{2} \int_{r_1}^{r_0} r \tau 2\pi r dr + \int_0^{r_1} r \tau 2\pi r dr + r \tau 2\pi r_i h \quad (6)$$

Dimana r_0 adalah radius *shoulder*, r_1 adalah radius *pin*, dan h adalah panjang *pin* (*pin high*).

$$M = \frac{2\pi\sigma}{\sqrt{3}} \left[\frac{1}{2} \int_{r_1}^{r_0} r^2 dr + \int_0^{r_1} r^2 dr + r_i^2 \times h \right] \quad (7)$$

2.2 Hipotesis Penelitian

Secara umum ada dua hipotesis dalam penelitian, yaitu hipotesis ilmiah dan hipotesis statistik. Pada penelitian ini, peneliti mengajukan hipotesis atas permasalahan yang dimiliki diantaranya yaitu:

2.2.1 Hipotesis Ilmiah

Hipotesis ilmiah memiliki dua bentuk, yaitu :

a. Hipotesis Umum

Terdapat hubungan antara *dwell time* dan *plunge depth* terhadap hukum gesekan coulomb, energi panas dan gaya aksial yang mempengaruhi kaulitas hasil lasan μ FSSW pada *similar* Al-Al, *similar* Mg-Mg dan *dissimilar* Al-Mg.

b. Hipotesis Eksplisit

Terdapat nilai korelasi antara *dwell time* dan *plunge depth* terhadap hukum gesekan coulomb, energi panas dan gaya aksial yang mempengaruhi kaulitas hasil lasan μ FSSW pada *similar* Al-Al, *similar* Mg-Mg dan *dissimilar* Al-Mg.

2.2.2 Hipotesis Statistik

Hipotesis statistik memiliki dua bentuk, yaitu hipotesis alternatif (H_a) dan hipotesis nol (H_0).

a. Hipotesis Alternatif (H_a)

Terdapat korelasi yang signifikan antara *dwell time* dan *plunge depth* terhadap hukum gesekan coulomb, energi panas dan gaya aksial yang mempengaruhi kaulitas hasil lasan μ FSSW pada *similar* Al-Al, *similar* Mg-Mg dan *dissimilar* Al-Mg.

b. Hipotesis Nol (H_0)

Tidak terdapat korelasi yang signifikan antara *dwell time* dan *plunge depth* terhadap hukum gesekan coulomb, energi panas dan gaya aksial yang mempengaruhi kaulitas hasil lasan μ FSSW pada *similar* Al-Al, *similar* Mg-Mg dan *dissimilar* Al-Mg.