TUGAS AKHIR – TL141584

STUDI EKSPERIMENTAL *FRICTION STIR WELDING* ALUMINIUM 5083 DENGAN VARIASI KECEPATAN PUTARAN DAN KEMIRINGAN *TOOL*

IVAN AJI KUNTAR
NRP. 2712 100 030

Dosen Pembimbing
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

(halaman sengaja dikosongkan)

FINAL PROJECT - TL141584

EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTION STIR WELDING ALUMINUM 5083 VARIATIONS ON ROTATION SPEED AND TILT OF TOOL

IVAN AJI KUNTAR
NRP. 2712 100 030

Advisor
Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

(page left intentionally blank)

STUDI EKSPERIMENTAL *FRICTION STIR WELDING* ALUMINIUM 5083 DENGAN VARIASI KECEPATAN PUTARAN DAN KEMIRINGAN *TOOL*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
IVAN AJI KUNTAR
NRP 2712100030

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. .....(Pembimbing)
2. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc. .....(Co-Pembimbing)

Surabaya,
Juli 2016

(halaman sengaja dikosongkan)

STUDI EKSPERIMENTAL *FRICTION STIR WELDING* ALUMINIUM 5083 DENGAN VARIASI KECEPATAN PUTARAN DAN KEMIRINGAN *TOOL*

Nama	**: Ivan Aji Kuntar**
NRP	**: 2712100030**
Jurusan	**: Teknik Material dan Metalurgi**
Dosen Pembimbing	**: Mas Irfan P.H, S.T., M.Sc., Ph.D**
Co-Pembimbing	**: Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.**

ABSTRAK

Pengelasan merupakan teknik fabrikasi yang umum digunakan dalam sebuah konstruksi logam. Pada konstruksi kapal, material yang umum digunakan adalah aluminium paduan magnesium dengan seri penamaan aluminum alloy (AA) 5083. Paduan aluminium merupakan logam yang memiliki sifat weldability yang kurang baik sehingga dikembangkan metode yang baru yaitu friction stir welding. Pada penelitian ini digunakan paduan aluminium AA 5083 untuk dilakukan pengelasan friction stir welding secara butt joint. Parameter yang digunakan adalah kecepatan putaran tool 1115&1725 rpm dan sudut kemiringan tool 0^0 & 2^0. Dari hasil yang diperoleh, ditemukan adanya cacat pengelasan berupa ketidaksempurnaan daerah adukan las. Peningkatan rpm dan penurunan kemiringan tool menghasilkan masukan panas yang semakin besar sehingga mempengaruhi struktur mikro dengan didapatinya Mg_2Si. Distribusi kekerasan menunjukkan nilai kekerasan yang semakin menurun dari daerah base metal ke nugget zone. Namun nilai penurunannya tidak signifikan karena sifat aluminum 5083 yang tidak dapat diperlakupanaskan.

Kata Kunci : fsw, rpm, kemiringan *tool*, sifat mekanik

(halaman sengaja dikosongkan)

EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTION STIR WELDING ALUMINUM 5083 VARIATIONS ON ROTATION SPEED AND TILT OF TOOL

Name	**: Ivan Aji Kuntar**
NRP	**: 2712100030**
Department	**: Materials and Metallurgical Eng**
Advisor	**: Mas Irfan P.H, S.T., M.Sc., Ph.D**
Co-Advisor	**: Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.**

ABSTRACT

Welding is a common fabrication technique used in a metal construction. On the construction of ship, a commonly used material is aluminum-magnesium alloy with naming series aluminum alloy (AA) 5083. Aluminum is a metal that has lack weld ability properties so that new method developed. That method is friction stir welding. On this research is used aluminum alloy 5083 to do friction stir welding in butt joint. Parameter used is the speed of tool rotation 1115 and 1725 rpm, then tilt angle of tool is 0^0 and 2^0. From the result obtained, it was discovered the existence of defect from welding imperfection that formed at stirred nugget zone. An increase rpm and decreased tilt angle of tool generates heat that bigger so that affects in the microstructure and be found Mg_2Si. The distribution of hardness showed the value hardness decrease from the base metal to stirred nugget zone. But the value of his descent is not significant because the properties of aluminum alloy 5083 that can non heat treatable.

Keywords : fsw, rpm, tilt of tool, mechanical properties

(page left intentionally blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, Sang Maha Pencipta Seluruh Alam Semesta,Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang yang telah memberikan limpahan karunia sehingga penulis dapat menyelesaikan seluruh rangkaian penyusunan laporan Tugas Akhir dengan judul *"*Studi Eksperimental *Friction Stir Welding* Aluminium 5083 dengan Variasi Kecepatan Putaran dan Kemiringan *Tool"*.

Terima kasih kepada semua pihak yang berperan pada penulisan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Orang tua dan adik saya yang telah memberikan doa, dukungan, dan semangat yang sangat berguna.
2. Bapak Mas Irfan P.Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D dan Bapak Wikan Jatimurti, S.T., MSc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang telah memberikan bimbingan dan motivasi kepada penulis.
3. Teman – teman senasib seperjuangan selama di ITS.
4. Seluruh pihak yang telah memberikan kontribusi atas penulisan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan, dibalik itu terdapat niat tulus untuk berbagi pengetahuan bagi sesama. Penulis berharap bahwa laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis sendiri, pembaca dan para peneliti.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

(halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR PENGESAHAN v
ABSTRAK vii
ABSTRACT ix
KATA PENGANTAR xi
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR TABEL xix
BAB I PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 3
1.5 Manfaat Penelitian 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA
2.1 Penelitian Sebelumnya 5
2.2 Aluminium dan Paduannya 8
2.3 Aluminium 5083 13
2.4 Pengelasan dan Metodenya 15
2.5 Friction Stir Welding 20
2.6 Cacat Las 31
BAB III METODOLOGI
3.1 Bahan Penelitian 33
3.2 Alat Penelitian 33
3.3 Diagram Alir 37
3.4 Prosedur Penelitian
3.4.1 Preparasi Tool dan Material 38
3.4.2 Proses Friction Stir Welding 39
3.4.3 Pembuatan Spesimen untuk Pengujian 39

3.4.4 Pengujian 39
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN
4.1 Analisis Data
4.1.1 Hasil Pengamatan Visual Tampak Atas 45
4.1.2 Hasil Pengamatan Visual Tampak Bawah 47
4.1.3 Hasil Pengamatan Makro Etsa 49
4.1.4 Hasil Pengujian Kekerasan 51
4.1.5 Hasil Pengamatan Struktur Mikro 54
4.1.6 Hasil Pengujian XRD 58
4.2 Pembahasan 59
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN
5.1 Kesimpulan 65
5.2 Saran 65
DAFTAR PUSTAKA xxi
LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Desain *Bobbin Tool* 6
Gambar 2.2 Geometri *Tool* yang digunakan Malik 7
Gambar 2.3 Geometri *Tool* (a) eksperimen berulir (b) eksperimen tanpa uliran (c) pemodelan berulir dan (d) pemodelan tanpa uliran 8
Gambar 2.4 Diagram Fase Al-Mg 12
Gambar 2.5 Semburan Api Netral dan Temperaturnya 17
Gambar 2.6 Nyala Api Netral 17
Gambar 2.7 Nyala Api Reduksi 17
Gambar 2.8 Nyala Api Oksidasi 18
Gambar 2.9 Skema Pengelasan Busur Rendam 19
Gambar 2.10 Skema Pengelasan Terak Listrik 20
Gambar 2.11 Skema dari *Friction Stir Welding* 20
Gambar 2.12 Aliran Material (a) horizontal (b) vertikal 21
Gambar 2.13 Zona Hasil *Friction Stir Welding* 22
Gambar 2.14 Skema Kemiringan *Tool* 25
Gambar 2.15 Jenis *Tool* yang digunakan pada *Friction Stir Welding* 26
Gambar 2.16 Zona Proses Metalurgi pada *Friction Stir Welding* 27
Gambar 2.17 Zona Aliran Logam pada *Friction Stir Welding* 29
Gambar 3.1 Mesin Frais 33
Gambar 3.2 Mesin Bubut 34
Gambar 3.3 Gerinda 35
Gambar 3.4 Mesin Uji hardness 35
Gambar 3.5 Mikroskop Metalurgi 36
Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian 37
Gambar 3.7 Dimensi *Tool* yang Digunakan 38
Gambar 3.8 Dimensi Plat Aluminium 5083 38
Gambar 3.9 Uji Kekerasan Vickers 41
Gambar 3.10 Alur Pantul Sinar Pada Metalografi 42
Gambar 3.11 Prinsip Kerja XRD 42

Gambar 4.1 Hasil Tampak Atas Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 0^o 45
Gambar 4.2 Hasil Tampak Atas Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 2^o 45
Gambar 4.3 Hasil Tampak Atas Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 0^o 46
Gambar 4.4 Hasil Tampak Atas Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 2^o 46
Gambar 4.5 Hasil Tampak Bawah Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 0^o 47
Gambar 4.6 Hasil Tampak Bawah Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 2^0 47
Gambar 4.7 Hasil Tampak Bawah Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 0^o 48
Gambar 4.8 Hasil Tampak Bawah Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 2^o 48
Gambar 4.9 Struktur Makro Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 0^o 49
Gambar 4.10 Struktur Makro Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 2^o 49
Gambar 4.11 Struktur Makro Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 0^o 50
Gambar 4.12 Struktur Makro Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 2^o 50
Gambar 4.13 Grafik Distribusi Kekerasan dengan Parameter 1115 rpm dan sudut 0^0 51
Gambar 4.14 Grafik Distribusi Kekerasan dengan Parameter 1115 rpm dan sudut 2^0.....51
Gambar 4.15 Grafik Distribusi Kekerasan dengan Parameter 1725 rpm dan sudut 0^0.....52
Gambar 4.16 Grafik Distribusi Kekerasan dengan Parameter 1115 rpm dan sudut 2^0.....52
Gambar 4.17 Tipikal Distribusi Kekerasan pada *Friction Stir Welding* dengan Logam Sejenis 53

Gambar 4.18 Struktur Mikro pada parameter pengelasan 1115 rpm dan 0^0 pada daerah (a) BM (b) NZ (c) HAZ sisi RS (d) HAZ sisi AS e) TMAZ sisi RS (f) TMAZ sisi AS 54
Gambar 4.19 Struktur Mikro pada parameter pengelasan 1115 rpm dan 2^0 pada daerah (a) BM (b) HAZ sisi RS (c) HAZ sisi AS (d) TMAZ sisi RS (e) TMAZ sisi AS.....55
Gambar 4.20 Struktur Mikro pada parameter pengelasan 1725 rpm dan 0^0 pada daerah (a) BM (b) NZ (c) HAZ sisi RS (d) HAZ sisi AS (e) TMAZ sisi RS (f) TMAZ sisi AS 56
Gambar 4.21 Struktur Mikro pada parameter pengelasan 1725 rpm dan 2^0 pada daerah (a) BM (b) HAZ sisi RS (c) HAZ sisi AS (d) TMAZ sisi RS (e) TMAZ sisi AS.....57
Gambar 4.22 Pola XRD Hasil *Friction Stir Welding* 58

(halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Klasifikasi Paduan Aluminium Tempa 10
Tabel 2.2 Klasifikasi Paduan Aluminium Cor 10
Tabel 2.3 Komposisi Kimia Aluminium seri 5083 14
Tabel 2.4 Sifat Mekanik Aluminium seri 5083 14

(halaman sengaja dikosongkan)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era industrialisasi, perkembangan teknologi pengelasan berkembang pesat. Teknik ini telah banyak diaplikasikan di berbagai industri manufaktur seperti bidang penerbangan, otomotif, konstruksi dan masih banyak lagi. Hasil dari lasan dinilai lebih ringan dibandingkan teknik penyambungan lainnya. Proses penyambungannya pun lebih cepat dikarenakan tidak perlu membuat lubang terlebih dahulu seperti pada teknik penyambungan menggunakan paku keling (*rivet joints*) atau baut, sehingga biaya produksi dapat berkurang. Dari beberapa kelebihan tersebut, penelitian mengenai teknik pengelasan banyak dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanis sambungan yang sesuai dengan kebutuhan pada suatu konstruksi serta dapat juga diaplikasikan dengan baik termasuk pada logam yang dirasa cukup sulit dilas, seperti aluminium (Nurdiansyah, 2012; Gungor, 2013; Rasyid, 2015).

Pengelasan secara konvensional diartikan sebagai proses penyambungan dua logam dan atau paduan-paduan logam dengan cara memanasi baik di atas batas cairnya atau di bawah batas cair tersebut, disertai dengan tekanan/tanpa tekanan ditambah dengan logam pengisi atau tanpa logam pengisi (Musaikan, 2002).

Pengelasan pada aluminium secara umum menggunakan metode *fusion welding* yaitu GMAW dan GTAW yang pada hasil dari pengelasan dengan metode tersebut masih kerap ditemukan adanya *defect* pada daerah lasan. Cacat las yang sering terjadi diantaranya berupa porositas dan retakan. (Leonard & Lockyer, 2003). Selain itu, dampak yang dihasilkan dari proses pengelasan dengan metode GTAW dan GMAW terhadap kesehatan juga kurang baik karena dibutuhkannya *shielding gas*. Dan secara metalurgi, adanya *filler* yang digunakan sangat memungkinkan perubahan komposisi kimia yang berpengaruh pada sifat mekaniknya.

Untuk mengatasi adanya hal tersebut, dikembangkan sebuah proses pengelasan yaitu pengelasan pada kondisi padat atau *solid state welding*. Pada tahun 1991, TWI menemukan sebuah metode pengelasan yang dinamakan *Friction Stir Welding* (Thomas dkk, 1991). Di mana pada pengelasan ini, material yang akan dilas tidak benar-benar mencair dan masih dalam keadaan solid.

Pada penelitian tugas akhir ini, proses *friction stir welding* dilakukan dengan memvariasikan kecepatan *tool* berputar dan sudut yang diberikan pada *tool*. Dua variabel ini sangatlah penting karena mempengaruhi panas yang dihasilkan dan kualitas hasil lasan nantinya. Pemeriksaan yang dilakukan adalah secara visual, struktur makro, xrd dan mikro serta sifat mekanik dari plat aluminium yang telah dilakukan proses *friction stir welding*.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan apa yang telah diuraikan pada latar belakang diatas, maka dapat diketahui perumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh kecepatan putaran dan kemiringan *tool* pada pengelasan *friction stir welding* aluminium seri 5083 terhadap struktur mikro dan sifat mekanik ?
2. Bagaimana mekanisme terjadinya *joining* pengelasan dengan metode *friction stir welding* ?

1.3 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang sesuai dengan referensi yang ada serta tidak menyimpang dari permasalahan yang akan ditinjau, maka terdapat beberapa batasan masalah yang perlu diperhitungkan diantaranya sebagai berikut :

1. Pengaruh dari lingkungan diabaikan.
2. Kecepatan putaran dan *welding speed* dianggap konstan.
3. Perpindahan panas dari proses pengelasan ke *backing plate* diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari dilaksanakannya penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh kecepatan putaran dan kemiringan *tool* pada pengelasan *friction stir welding* aluminium seri 5083 terhadap struktur mikro dan sifat mekanik.
2. Menganalisis mekanisme terjadinya pengelasan dengan metode *friction stir welding*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah mampu memberikan informasi mengenai pengembangan metode pengelasan dalam kondisi padat secara *friction stir welding*, di mana memiliki banyak variabel yang harus ditentukan untuk meraih hasil pengelasan yang baik.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Sebelumnya

Pengelasan dengan metode *friction stir welding* mulai ditemukan pada tahun 1991 oleh Thomas di The Welding Institute, Inggris. Metode memiliki banyak keuntungan dibandingkan metode lainnya sehingga mulai untuk dikembangkan dan diaplikasikan pada penelitian-penelitian selanjutnya baik secara eksperimen maupun numerik hingga sekarang.

Pada penelitian sebelumnya, Nurdiansyah di tahun 2012 melakukan pengelasan *friction stir welding* pada aluminium paduan 5083 dengan tebal 4 mm dengan ukuran 20 mm x 10 mm menggunakan empat variasi RPM sebesar (394, 536, 755, 1084) dengan travel speed sebesar 0.33 mm/detik serta sudut inklinasi 3^0. Kemudian dilakukan analisa terhadap perubahan metalurgi, *defect* yang terjadi dan besarnya *heat input* yang diwakilkan dengan temperatur pada permukaan weld joint. Dari hasil percobaan diketahui bahwa semakin besar RPM maka semakin besar suhu pengelasan menyebakan bentuk butir semakin besar, *surface irragularitis* semakin pendek, kekerasan material menjadi lebih rendah serta diskontinuitas berupa *weld flash* semakin besar. Variasi RPM yang paling optimum adalah RPM dengan kecepatan putar 755 karena pada variasi RPM ini tidak terdapat *defect* pada *weld joint* serta memiliki panjang *surface irragularitis* cukup pendek.

Di tahun 2013, Gungor dkk melaksanakan pengelasan *friction stir welding* pada dua plat berbeda jenis yaitu paduan aluminium 5083-H111 dan 6082-T651 dengan ketebalan 6 mm. Parameter yang digunakan adalah kecepatan rotasi tool 1250 rpm, welding speed sebesar 64 mm/min dan kemiringan tool 2^o. Hasil uji tarik menunjukkan peningkatan nilai tegangan luluh. Pada nilai kekuatan lelah, pengelasan logam tak sejenis ini justru menurunkan kekuatannya jika dibandingkan dengan pengelasan

logam yang sejenis. Meskipun hasil radiografik tidak menunjukkan cacat, namun hasil lasan memperlihatkan adanya kemungkinan adanya *void* pada menurunnya kekuatan lelah.

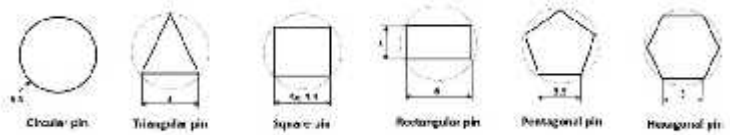
Di tahun yang sama, Liu dkk mencoba melakukan *friction stir welding* menggunakan *bobbin tool* yang ditunjukkan pada gambar 2.1 di mana *tool* ini memiliki diameter *shoulder* yang berbeda dan diameter *pin* sebesar 8mm. Parameter yang digunakan adalah putaran *tool* 600 rpm dan *welding speed* bervariasi dari 50-250 mm/min. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan welding speed sebanding dengan ukuran butir di stir zone, sedangkan di daerah haz ukuran butir tidak berpengaruh. Pada uji tarik, elongasi dan kekuatan tarik meningkat seiring besarnya *welding speed* yang digunakan. Hasil lasan yang bebas cacat ditemukan pada pengelasan dengan *welding speed* yang lebih rendah dan daerah patahan terjadi di daerah *heat affected zone* ke *thermal mechanically affected zone* pada sisi *advancing side*.

Gambar 2.1 Desain *Bobbin Tool* (Liu dkk, 2013)

Pada tahun 2014, Wijayanto melakukan penelitian *friction stir welding* dengan kecepatan putaran 1125 rpm dan kecepatan pengelasan 30mm/menit. Sedangkan variasinya adalah kemiringan tool yaitu sebesar 1°, 2°, 3° dan 4°. Pengujian yang dilakukan terhadap hasil lasan adalah uji tarik, kekerasan,

struktur makro dan mikro.Hasilnya menunjukkan bahwa kekuatan tarik tertinggi pada sudut kemiringan tool 3°. Nilai kekerasan rata-rata pada *retreating side* lebih tinggi jika dibandingkan dengan *advancing side*. Kekuatan tarik meningkat seiring pertambahan sudut namun kemudian menurun pada sudut 4^o. Pada struktur mikro, ukuran butir pada HAZ semakin besar sebanding dengan pertambahan sudut.

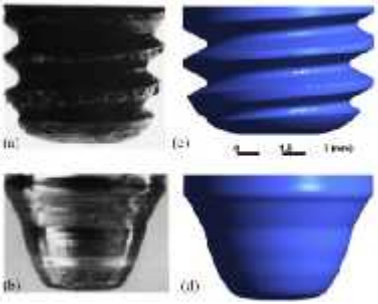
Banyaknya aluminium yang diaplikasikan pada dunia otomotif dan penerbangan yang masih cukup sulit untuk dilas (Al 7xxx dan 2xxx), maka Malik dkk (2014) mencoba untuk mengamati pengaruh variasi bentuk *tool* terhadap proses *friction stir welding*. Dalam penelitian ini dilakukan secara simulasi numerical. Bentuk *tool* yang digunakan adalah *circular, triangular, square, rectangular, pentagonal* dan *hexagonal* yang ditunjukkan pada gambar 2.2 dan masih terbagi lagi menjadi 2 macam yaitu *frustum* dan *straight*. Yang menjadi fokus dalam penelitian ini adalah temperatur, *stir zone* dan konsumsi energi yang dibutuhkan dalam proses pengelasan. Parameter tetap yang digunakan adalah kecepatan rotasi 950rpm, kecepatan translasi 60mm/min, *dwell time* 10s dan sudut inklinasi 0^o. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *tool* dengan bentuk *circular* dan *frustum* menghasilkan daerah hasil lasan paling baik dibanding parameter lain. Dan secara keseluruhan, tipe *frustum* menggunakan konsumsi energi yang lebih rendah dan mampu meminimalkan terjadinya *defect*.



Gambar 2.2 Geometri *Tool* yang digunakan Malik (Malik dkk, 2014)

Hasan dkk (2015) mencoba mengembangkan *friction stir welding* dengan penggunaan *tool* yang berulir dan tanpa uliran

yang ditampilkan dalam gambar 2.3. Parameter pada *tool* ini dipadukan dengan kecepatan rotasi dari 300rpm, 600rpm dan 900rpm. Penelitian oleh Hasan menunjukkan bahwa deformasi yang lebih tinggi justru didapat oleh *tool* yang tanpa uliran dan distribusi deformasinya lebih merata. Ini dapat terjadi karena dengan adanya uliran, maka luasan kontak yang terjadi antara *tool* dan material yang akan dilas menjadi berkurang sehingga panas yang dihasilkan pun tidak cukup untuk mendeformasi plastis material. Dan jika dilihat pada MAZ (*mechanical affected zone*), uliran mampu menentukan kualitas lasan. Meskipun dengan adanya uliran, *tool* masih mampu mendeformasi material, volume material yang terdeformasi dan aliran yang terjadi kurang signifikan. Menghasilkan deformasi yang kurang maksimal dan butiran material yang teraduk pada daerah lasan kurang baik sehingga terjadi penurunan kualitas lasan.



Gambar 2.3 Geometri *Tool* (a) eksperimen berulir (b) eksperimen tanpa uliran (c) pemodelan berulir dan (d) pemodelan tanpa uliran (Hasan dkk, 2015)

2.2 Aluminium dan Paduannya

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai kekuatan tinggi, tahan terhadap karat dan merupakan konduktor listrik yang baik. Logam ini dipakai secara luas dalam bidang kimia, listrik, bangunan, transportasi dan alat penyimpanan. Kemajuan dalam bidang pengelasan aluminium dan paduannya

berkembang pesat sehingga penggunaannya pun meningkat dalam banyak bidang. Dalam proses untuk mendapatkan aluminium menggunakan metode elektrolisis. Sebagai tambahan terhadap kekuatan mekaniknya agar meningkat dapat dilakukan penambahan Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni secara satu persatu atau bersama-sama, hal ini juga mampu meningkatkan sifat ketahan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian rendah dan lainnya. Aluminium (99,9%) memiliki berat jenis sebesar 2,7 g/cm^3 densitas 2,685 kg/m^3 dan titik leburnya pada 660 C. Dan juga, aluminium memiliki *strength to weight ratio* yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan baja. Sifat ketahanan korosi diperoleh dari terbentuknya lapisan oksida aluminium pada permukaan akibat bereaksi dengan oksigen yang ada di udara. Lapisan ini melekat sangat kuat dan stabil sehingga melindungi bagian yang ada di dalamnya.

Aluminium dapat diklasifikasikan dengan 3 cara yaitu berdasarkan pembuatan, kemampuan diperlaku panas dan unsur paduannya. Berdasarkan pembuatannya, terbagi menjadi dua yaitu paduan cor dan tempa. Sedangkan pada perlakuan panasnya terdiri dari paduan *non heat treatable* dan *heat treatable*. Paduan yang dapat diperlaku-panaskan adalah paduan yang kekuatannya dapat diperbaiki dengan pengerasan dan penemperan, sedangkan yang tidak dapat dilaku panas hanya dapat dilakukan dengan pengerjaan dingin. Pengerasan pada paduan aluminium yang dapat dilaku panas terjadi bukan karena adanya transformasi martensit seperti baja karbon, akan tetapi karena adanya pengendapan halus fasa dalam butir kristal paduan. Karena proses ini maka pengerasan pada aluminium disebut pengerasan endap atau presipitasi. Sifat pengerasan presipitasi pada aluminium tergantung pada unsur–unsur paduannya. Berdasarkan paduannya, aluminium tempa dan cor terbagi menjadi beberapa klasifikasi di dalam tabel 2.1 dan tabel 2.2 :

Tabel 2.1 Klasifikasi Paduan Aluminium Tempa (ASM, 2005)

Paduan	Seri Penamaan
Aluminium dengan kemurnian 99%	1XXX
Aluminium – Tembaga (Al-Cu)	2XXX
Aluminium – Mangan (Al-Mn)	3XXX
Aluminium – Silikon (Al-Si)	4XXX
Aluminium – Magnesium (Al-Mg)	5XXX
Aluminium – Magnesium Silikon (Al-Mg-Si)	6XXX
Aluminium – Seng (Al-Zn)	7XXX
Paduan Lainnya	8XXX

Tabel 2.2 Klasifikasi Paduan Aluminium Cor (ASM, 2005)

Paduan	Seri Penamaan
Aluminium dengan kemurnian 99%	1XXX
Aluminium – Tembaga	2XXX
Aluminium – Silikon – Tembaga/Magnesium	3XXX
Aluminium – Silikon (Al-Si)	4XXX
Aluminium – Magnesium (Al-Mg)	5XXX
Aluminium – Seng (Al-Zn)	7XXX
Aluminium – Timah (Al-Sn)	8XXX
Paduan Lainnya	9XXX

Berikut sifat umum dari beberapa jenis paduan pada aluminium :

1. Paduan Al murni (seri 1XXX)

Jenis ini adalah aluminium dengan kemurnian antara 99,0% sampai 99,9%. Aluminium dalam seri ini bersifat tahan karat, konduksi panas dan listrik yang baik dan juga memiliki sifat mampu las dan potong yang sangat baik. Namun, kekuatan yang dimiliki masih cukup rendah.

2. Paduan Al-Cu (seri 2XXX)

Jenis merupakan salah satu paduan aluminium yang dapat diperlakupanaskan. Dengan melalui pengerasan endap, sifat mekanik yang dimiliki dapat menyamai dari baja lunak, akan tetapi memiliki daya tahan korosi yang rendah jika dibandingkan dengan jenis paduan yang lain. Paduan jenis ini banyak

digunakan pada konstruksi keeling dan juga dalam konstruksi pesawat terbang seperti duralumin (2017) dan super duralumin (2024).

3. Paduan Al-Mn (seri 3XXX)

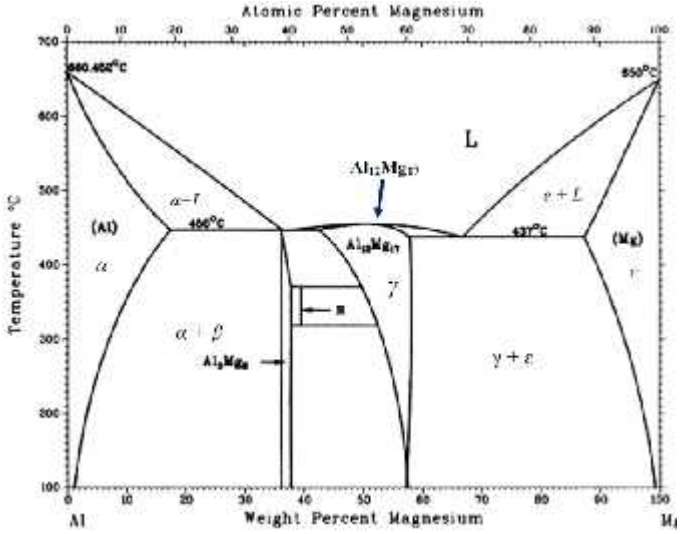
Mn merupakan unsur yang memperkuat sifat mekanik tanpa mengurangi ketahan korosi. Paduan ini adalah jenis yang tidakdapat diperlakupanaskan sehingga kenaikan kekuatannya hanya dapat diusahakan melalui pengerjaan dingin dalam proses pembuatannya. Bila dibandingkan dengan paduan seri 1XXX ini memiliki sifat yang hamper sama, tetapi sifat mekaniknya lebih baik dan unggul dari paduan Al murni. Dalam diagram fasa, Al-Mn yang ada dalam keseimbangan dengan larutan padat aluminum adalah Al_6Mn (25,3%).

4. Paduan Al-Si (seri 4XXX)

Paduan ini dalam keadaan cair mempunyai sifat mampu alir yang baik dan minim retakan pada proses pembekuannya. Sehingga banyak digunakan sebagai bahan atau logam las dalam pengelasan aluminium baik paduan cor maupun tempa. Paduan ini memiliki ketahanan korosi yang baik, sangat ringan, koefisien permukaan yang sangat kecil dan sebagai penghantar panas dan listrik yang baik. Sifat paduan ini dapat diperbaiki oleh unsur paduan lain dan perlakuan panas. Umumnya dilakukan pemaduan dengan 0,15-0,4% Mn dan 0,5% Mg. Koefisien pemuaian termal Si yang sangat rendah membuat koefisien termal paduannya juga rendah jikan kandungan Si semakin banyak. Paduan Al-Si banyak digunakan sebagai elektroda pengelasan, terutama dengan kandungan 5%Si. Paduan seri 4032 yang mengandung 12,5% mudah ditempa dan memiliki koefisien muai panas yang sangat rendah dan digunakan untuk piston yang ditempa.

5. Paduan Al-Mg (seri 5XXX)

Dalam paduan binerAl-Mg satu fasa yang ada dalam keseimbangan dengan larutan padat Al adalah larutan padat yang merupakan senyawa antar logam Al_3Mg_2. Sel satuannya adalah heksagonal susunan rapat, namun terkadang ditemukan berupa kubus perpusat muka. Titik eutektik berada pada 450 C,35%Mg dan batas kelarutan padat pada temperature eutektik adalah 17,4% yang menurun sampai temperature kamar kira-kira 1,9% Mg. Paduan Al-Mg yang mempunyai ketahan korosi sangat baik disebut hidrinalium. Paduan dengan 2-3% Mg dapat mudah ditempa Jenis ini termasuk paduan yang tidak dapat diperlakupanaskan, tetapi memiliki sifat yang baik terhadap daya tahan korosinya. Paduan ini banyak digunakan tidak hanya dalam konstruksi umum tetapi juga untuk tangki penyimpanan gas alam cair dan kapal. Berikut adalah diagram fase Al-Mg pada gambar 2.4 :



Gambar 2.4 Diagram Fase Al-Mg (ASM, 2005)

6. Paduan Al-Mg-Si (seri 6XXX)

Magnesium dan silikon dalam aluminum cenderung mampu membentuk Mg_2Si (Magnesium Silisida) yang memberikan kekuatan tinggi setelah *heat treatment*. Paduan ini termasuk dalam jenis yang dapat diperlakupanaskan dan mempunyai sifat mampu potong, mampu las dan daya tahan korosi yang baik. Namun hal yang menjadi kekurangan adalah terjadinya pelunakan pada daerah hasil lasan sebagai akibat dari panas yang terjadi selama proses pengelasan. Paduan seri 6053, 6061, 6063 memiliki sifat tahan korosi yang baik dibandingkan pada paduan aluminium *heat treatable* lainnya. Pengaplikasian aluminum seri 6XXX banyak digunakan untuk piston motor dan *silinder head* motor bakar.

7. Paduan Al-Zn seri (7XXX)

Jenis ini termasuk *heat treatable* dan biasanya dalam paduan ini ditambahkan Mg, Cu dan Cr. Kekuatan tarik yang dapat dicapai lebih dari 500 MPa sehingga paduan ini dinamakan juga ultra duralumin. Paduan tersebut adalah paduan seri 7075 terdiri dari 95,5%Al; 2,5% Zn; 1,5%Mn; 0,3%Cu; 0,2%Cr di mana paduan ini mempunyai kekuatan tertinggi di antara paduan aluminium lainnya. Berlawanan dengan kekuatan tariknya, sifat mampu lasa dan daya tahan korosinya masih kurang baik. Penggunaan paduan ini paling besar adalah untuk bahan konstruksi pesawat udara.

2.3 Aluminium 5083

Paduan aluminium 5083 merupakan paduan dari aluminium dengan kandungan magnesium berkisar 5%. Di antara paduan *non heat treatable* lainnya, paduan seri ini memiliki kekuatan yang paling tinggi. Daya tahan aluminium 5083 terhadap korosi sangat baik dan mempunyai kinerja yang luar biasa jika digunakan di lingkungan yang ekstrim. Aluminiumu 5083 juga sangat kuat terhadap serangan air laut dan lingkungan

kimia industri. Sehingga sering diaplikasikan pada konstruksi kapal dan penyimpanan bahan kimia.

Adapun komposisi kimia dan sifat –sifat dari aluminium seri 5083 ditunjukkan pada tabel 2.3 dan sifat mekaniknya pada table 2.4.

Tabel 2.3 Komposisi Kimia Aluminium seri 5083 (ASM, 2005)

Unsur	Presentase
Aluminium	92,4 – 95,6 %
Kromium	0,05 – 0,25 %
Tembaga	< 0,1 %
Besi	< 0,4 %
Magnesium	4 - 4,9 %
Mangan	0,4 – 1 %
Silikon	< 0,4 %
Titanium	< 0,15 %
Zink	< 0,25 %

Tabel 2.4 Sifat Mekanik Aluminium seri 5083 (ASM, 2005)

Sifat	Nilai
Kekerasan (Brinell)	85
Kekuatan Luluh	228 Mpa
Ultimate Tensile Strength	317 Mpa
Regangan saat patah	16%
Modulus Elastisitas	70,3 Gpa
Modulus Kompresif	71,7 Gpa
Poisson Ratio	0,33
Kekuatan Lelah	159 GPa ($5x10^8$ *cycle*s)
Shear Modulus	26,4 Gpa
Shear Strength	190 Mpa
Machinability	30%
Densitas	2,66 g/cm^3

2.4 Pengelasan dan Metodenya

Pengelasan adalah proses penyambungan setempat antara dua bagian logam atau lebih dengan memanfaatkan energi panas. Pengelasan merupakan teknik penyambungan logam yang dipergunakan secara luas, seperti pada konstruksi bangunan baja dan konstruksi mesin. Luasnya penggunaan teknologi pengelasan dikarenakan dalam proses pembuatan suatu konstruksi akan menjadi lebih ringan dan sederhana sehingga biaya produksi menjadi lebih murah dan efisien.

Berikut adalah jenis-jenis pengelasan yang umum digunakan di dunia industri :

a) Las Busur Listrik

Las Busur Listrik (SMAW: Shielded Metal Arc Welding) adalah proses pengelasan di mana panas dihasilkan dari busur nyala listrik antara ujung elektroda dengan logam yang dilas. Las SMAW merupakan pengelasan yang dilakukan dengan jalan mengubah arus listrik menjadi panas untuk melelehkan atau mencairkan permukaan benda yang akan disambung dengan membangkitkan busur nyala listrik melalui sebuah elektroda. Busur nyala listrik diakibatkan perbedaan tegangan listrik antara kedua kutub, yaitu benda kerja dan elektroda. Perbedaan tegangan ini disebut dengan tegangan busur nyala. Besarnya tegangan busur nyala ini antara 20 volt sampai 40 volt. Prinsip pengelasan las busur listrik adalah arus listrik yang cukup padat dan tegangan rendah bila dialirkan pada dua buah logam yang konduktif akan menghasilkan loncatan elekroda yang dapat menimbulkan panas yang sangat tinggi mencapai suhu 50000 C sehingga kedua logam tersebut dapat mencair.

Proses pemindahan logam cair seperti dijelaskan diatas sangat mempengaruhi sifat maupun las dari logam, dapat dikatakan bahwa butiran logam cair yang halus mempunyai sifat mampu las yang baik. Sedangkan proses pemindahan cairan sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya arus dan komposisi dari bahan fluks yang digunakan. Selama proses pengelasan fluks

yang digunakan untuk membungkus elektroda sebagai zat pelindung yang sewaktu pengelasan ikut mencair. Tetapi karena berat jenisnya lebih ringan dari bahan logam yang dicairkan, maka cairan fluks tersebut mengapung diatas cairan logam dan membentuk terak sebagai penghalang oksidasi. Dalam beberapa fluks bahan tidak terbakar, tetapi berubah menjadi gas pelindung dari logam cair terhadap oksidasi.

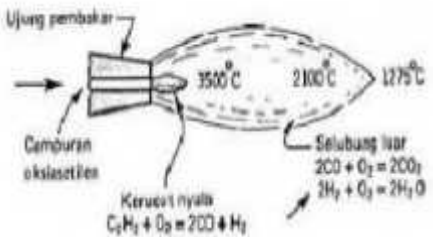
Elektroda SMAW terdiri dari 2 bagian yaitu bagian inti yang terbuat dari baja yang berfungsi sebagai bahan pengisi (filler) dan bahan pembungkus yang disebut fluks. Fungsi dari fluks adalah : sebagai sumber terak untuk melindungi logam cair dari udara sekitarnya, menjaga busur listrik agar tetap stabil, sebagai deoksidator, menghasilkan gas pelindung, mengurangi percikan api dan uap pada pengelasan, dan sebagai sumber dari unsur paduan. Kode elektroda sudah distandarkan atau ditetapkan standarisasi oleh AWS dan ASTM.

Gerakan elektroda pada saat pengelasan harus diperhatikan pada saat pengelasan berlangsung, karena gerakan elektroda juga dapat menentukan baik atau buruknya hasil pengelasan. Tujuan gerakan elektroda adalah untuk mendapatkan deposit logam las dengan permukaan yang rata dan halus dan menghindari terjadinya takikan dan pencampuran terak.

b) Las Oksiasetilen (Oxyacetilene Welding)

Pada las oxycetilene, panas dihasilkan dari reaksi pembakaran anatara gas acettylene dengan oksigen. Nyala yang dihasilkan terdiri dari dari 2 daerah/zona, yaitu:

Daerah pembakaran primer (primary combution) menghasilkan panas sekitar 1/3 dari total panas pembakaran sempurna. $C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$ di kerucut dalam daerah pembakaran sekunder yang terjadi setelah pembakaran primer berlangsung $2CO + O_2 = 2CO_2$ dan $2H_2 + 2O_2 = 2H_2O$ kerucut luar.



Gambar 2.5 Semburan Api Netral dan Temperaturnya

Berikut ini merupakan macam-macam nyala api pada las Oksi Asetilen:

1. Netral, jika jumlah gas C_2H dan O_2 sesuai dengan perbandingan stoikiometri.

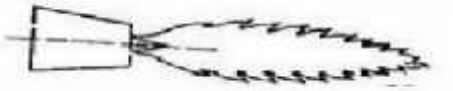
Gambar 2.6 Nyala Api Netral

2. Reduksi, jika terjadi kelebihan C_2H_2 akan terjadi pembakaran tak sempurna. Sehingga nyala api ini biasanya digunakan untuk pengelasan aluminium, magnesium dan untuk mencegah lepasnya karbon (decarburization) pada baja karbon tinggi.

Gambar 2.7 Nyala Api Reduksi

3. Oksidasi, jika terlalu banyak oksigen terjadi pembakaran tak sempurna. Nyala ini biasanya digunakan unsur-unsur yang mudah menguap waktu pengelasan seperti zinc atau

kuningan (paduan Cu-Zn) melalui pembentukan lapisan oksida.



Gambar 2.8 Nyala Api Oksidasi

c) Las Busur Tungsten Gas Mulia (GTAW)

Proses pengelasan di mana sumber panas berasal dari loncatan busur listrik antara elektroda terbuat dari wolfram/tungsten dan logam yang dilas. Pada pengelasan ini logam induk (logam asal yang akan disambung dengan metode pengelasan biasanya disebut dengan istilah logam induk) tidak ikut terumpan (non consumable electrode). Untuk melindungi electroda dan daerah las digunakan gas mulia (argon atau helium).Sumber arus yang digunakan bisa AC (arus bolak-balik) maupun DC (arus searah).

d) Las Busur Logam Gas (GMAW)

Proses pengelasan di mana sumber panas berasal dari busur listrik antara elektroda yang sekaligus berfungsi sebagai logam yang terumpan (filler) dan logam yang dilas. Las ini disebut juga metal inert gas (MIG) welding karena menggunakan gas mulia seperti argon dan helium sebagai pelindung busur dan logam cair.

e) Las Busur Electroda Terbungkus (SMAW)

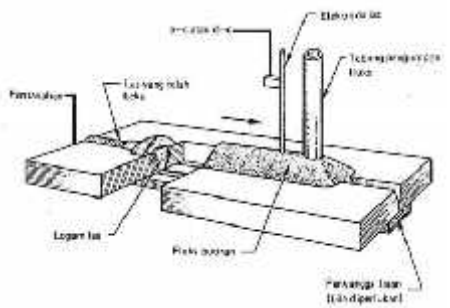
Proses pengelasan di mana panas dihasilkan dari busur listrik antara ujung elektroda dengan logam yang dilas. Elektroda terdiri dari kawat logam sebagai penghantar arus listrik ke busur dan sekaligus sebagai bahan pengisi (filler). Kawat ini dibungkus dengan bahan fluks.

Biasanya dipakai arus listrik yang tinggi (10-500 A) dan potensial yang rendah (10-50 V). Selama pengelasan, fluks

mencair dan membentuk terak (slag) yang berfungsi sebagai lapisan pelindung logam las terhadap udara sekitarnya. Fluks juga rnenghasilkan gas yang bisa melindungi butiran-butiran logam cair yang berasal dari ujung elektroda yang mencair dan jatuh ke tempat sambungan.

f) Las Busur Rendam (SAW)

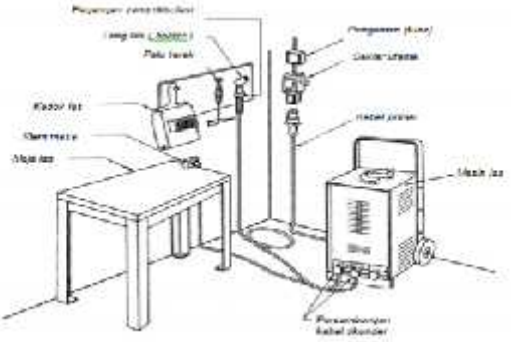
Proses pengelasan di mana busur listrik dan logam cair tertutup oleh lapisan serbuk fluks sedangkan kawat pengisi (filler) diumpankan secara kontinyu. Pengelasan ini diiakukan secara otomatis dengan arus listrik antara 500-2000 Ampere.



Gambar 2.9 Skema Pengelasan Busur Rendam

g) Las Terak Listrik

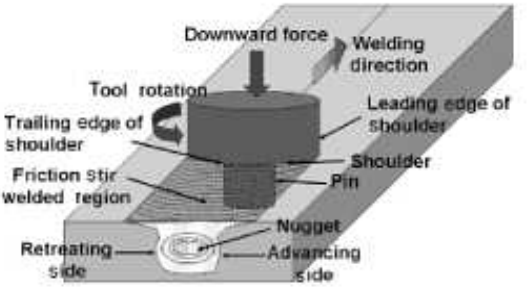
Proses pengelasan di mana energi panas untuk melelehkan logam dasar (base metal) dan logam pengisi (filler) berasal dari terak yang berfungsi sebagai tahanan listrik (I^2Rt) ketika terak tersebut dialiri arus listrik. Pada awal pengelasan, fluks dipanasi oleh busur listrik yang mengenai dasar sambungannya. Kemudian logam las terbentuk pada arah vertikal sebagai hasil dari campuran antara bagian sisi dari logam induk dengan logam pengisi (filler) cair. Proses pencampuran ini berlangsung sepanjang alur sambungan las yang dibatasi oleh plat yang didinginkan dengan air.



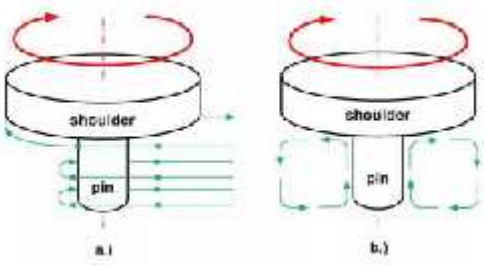
Gambar 2.10 Skema Pengelasan Terak Listrik

2.5 *Friction stir welding*

Metode *friction stir welding* ditemukan di *The Welding Institute* pada tahun 1991 sebagai teknik penyambungan pada kondisi solid yang pada awalnya diaplikasikan untuk paduan aluminium (Thomas dkk, 1991). Konsep dasar dari *friction stir welding* bias dikatakan cukup simpel. Sebuah *tool* silindris dengan *probe* berulir ataupun tidak, yang berotasi dan *nonconsumable* dengan desain khusus dimasukkan di antara sisi belakang masing-masing material yang akan dilas dan kemudian diarahkan mengikuti *joint line*. (ASM, 2007)



Gambar 2.11 Skema dari *Friction stir welding* (ASM, 2007)



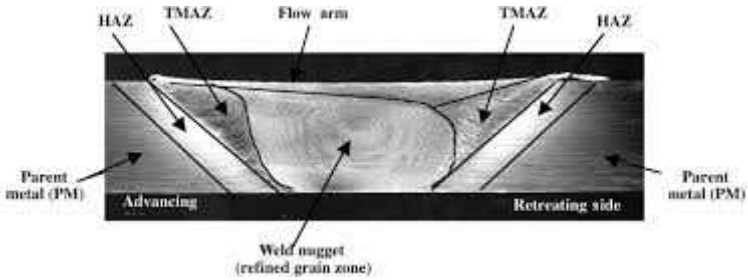
Gambar 2.12 Aliran Material (a) horizontal (b) vertikal

Logam yang akan dilas harus dicekam dengan baik dan ditempatkan di atas *backing plate* sehingga beban yang diberikan oleh *tool* dapat diteruskan ke benda kerja. Panas dihasilkan dari adanya gesekan di antara *tool* yang bergerak secara rotasi dan translasi dan benda kerja yang bersentuhan. Pada saat material akan mencair maka *tool* akan bergerak secara translasi sepanjang *joint line* yang menyebabkan terciptanya pencampuran mekanis antara dua material yang sedang dilas disertai dengan panas adiabatis di sekitar *tool*. Maka dari itu, 3 fungsi dari *tool* :

1. Memanaskan benda kerja dengan gesekan dan gaya tekan yang diberikan.
2. Memindahkan material yang sudah mendekati titik cair ke lokasi yang baru untuk menghasilkan sambungan.
3. Sebagai penahan material panas yang berada di bawah *shoulder*. (ASM, 2007)

Pada proses *friction stir welding*, maka akan terbentuk 4 daerah zona hasil lasan yang diakibatkan adanya panas dan mekanikal yang terlibat, daehah tersebut adalah :

1. *Parent Metal*, merupakan bagian dari material yang sama sekali tidak terpengaruh oleh panas dan gaya mekanik yang dihasilkan selama proses pengelasan terjadi.
2. *Heat Affected Zone*, area ini merupakan area yang yang paling dekat dengan pusat/titik lokasi pengelasan, di mana material pada zona ini mengalami siklus termal yang menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik dari base material, namun tidak terpengaruh oleh adanya deformasi plastis.
3. *Thermomecanically Affected Zone*, di mana pada zona ini *tool* mendeformasi plastis material yang akan dilas dan menghasilkan panas. Pengaruh panas dan mekanikal akan membentuk daerah las yang tersendiri dan merupakan daerah paling rentan terhadap perubahan sifat mekanik dan struktur mikro. Biasanya akan ada batas khusus yang membedakan antara area ini dengan *weld zone*.
4. *Weld Nugget/Zone*, area las yang mengalami proses rekristalisasi secara utuh dan merupakan area yang langsung bersentuhan dengan *tool*. Oleh karena itu, daerah ini dikenal juga dengan *stir zone*. (ASM, 2007)



Gambar 2.13 Zona Hasil *Friction Stir Welding* (ASM, 2007)

Siklus proses *friction stir welding* terbagi menjadi beberapa tahap yang di mana pada masing-masing langkah terdapat aliran panas dan *thermal profile* yang berbeda pula, siklus tersebut adalah :

1. *Dwell Time*, pada langkah proses pemanasan awal dilakukan pada benda kerja dengan cara membiarkan *tool* berputar tanpa gerak translasi (*stationery*). Pada langkah ini material yang ada di bawah *toolI* dipanaskan hingga benar-benar melunak dan *tool* siap untuk bergerak translasi sepanjang *joint line*. Biasanya pada langkah ini juga proses penetrasi *probe* dimulai.
2. *Transient Heating*, pada saat *tool* mulai untuk bergerak translasi biasanya ada saat pemanasan sementara di mana pada saat itu panas yang diciptakan dan temperatur pada sekitar *tool* menjadi tidak stabil dan bergerak hingga menjadi *steady-state* pada saat *tool* sudah mulai bergerak.
3. *Pseudo steady-state*, walaupun pada saat proses berlangsung terjadi fluktuasi temperature pada area sekitar *tool* tetapi secara termal pada area tersebut sudah konstan paling tidak secara mikrostruktur.
4. *Post Steady-state*, pada saat menjelang akhir dari proses pengelasan, panas akan meningkat pada sekitar *tool*. (Frigaard, 2001)

Pada standar ASM (2007), *Friction stir welding* dalam prosesnya memiliki beberapa parameter yang akan menentukan seberapa baik kualitas lasan yang dihasilkan. Parameter tersebut adalah :

1. Kecepatan Rotasi (rpm) dan Kecepatan Las (*feeding*)

   Pada proses pengelasan dengan metode *friction stir welding*, dibutuhkan sebuah *tool* yang bergerak secara rotasi dan translasi sekaligus sebagai fungsi untuk menghasilkan panas dan pengadukan material. Pemilihan

kedua parameter kecepatan ini harus dilakukan dengan tepat supaya proses pengelasan dapat berjalan dengan baik dan efisien. Untuk menghasilkan panas yang optimal, dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan memperbesar kecepatan rpm dan menurunkan kecepatan lasnya. Atau bisa juga dengan mengkombinasikan dua jenis kecepatan tersebut untuk mendapat panas yang diharapkan. Sehingga, material yang dilas dirasa cukup panas dan *viscous* sesuai yang dibutuhkan dalam pengelasan ini dan menimalisir beban pada *tool*.

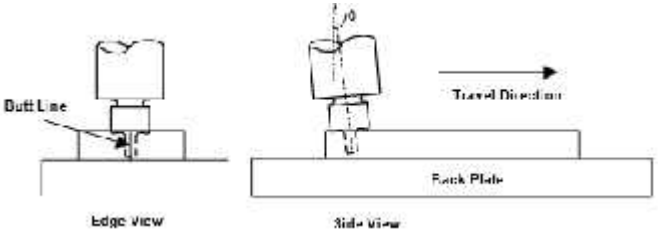
2. *Plunge Depth*, Tekanan dan Kemiringan *Tool*

   Plunge depth didefinisikan sebagai kedalaman titik terendah probe di bawah permukaan material yang dilas dan telah diketahui sebagai parameter kritis yang menjamin kualitas lasan. Hal ini perlu diatur dengan baik untuk menjamin tekanan ke bawah tercapai dan memastikan *tool* penuh menembus lasan. Plunge depth yang dangkal dapat mengakibatkan cacat dalam lasan, sebaliknya jika berlebihan bisa mengakibatkan kerusakan *tool* karena berinteraksi dengan alasnya.

   Tekanan pada *tool* diharapkan untuk menjaga material lunak tidak keluar jalur *joint line* dan memberi efek tempa (*forging*). Material panas ditekan dari atas oleh *shoulder* dan ditahan dari bawah oleh alas. Proses ini bertujuan untuk memadatkan material sehingga penguatan sambungan terjadi akibat efek tempa tersebut. Selain itu, tekanan yang diberikan juga menghasilkan panas tambahan karena adanya penambahan permukaan yang bergesekan dengan material.

   Kemiringan *tool* adalah besarnya sudut yang dibuat antara sumbu *tool* dengan permukaan benda kerja, hal ini harus sangat diperhatikan karena akan sangat mempengaruhi hasil dari pengelasan *friction stir welding*. Kemiringan yang dibuat berkisar 0-4^{o} di mana bagian

belakang *shoulder* lebih rendah dibandingkan dengan bagian depannya.



Gambar 2.14 Skema Kemiringan *Tool*

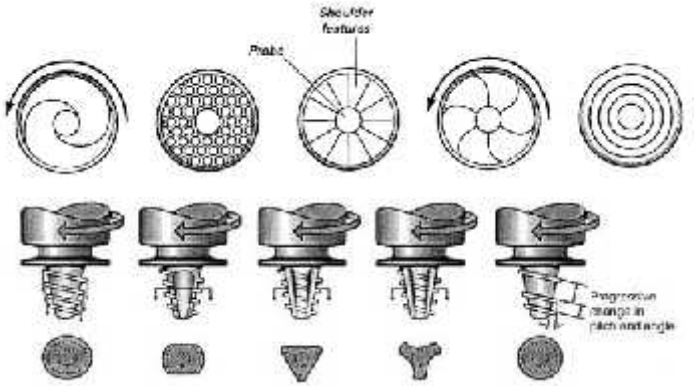
3. Desain *Tool*

Pada saat melakukan perancangan *tool*, hal pertama yang harus diperhatikan adalah pemilihan material dengan karakteristik yang harus dipenuhi. Karakteristik tersebut ialah :

a. Memiliki kekuatan yang baik di temperatur tinggi.
b. Stabilitas material baik di temperatur tinggi.
c. Tahan gesek dan aus.
d. Material tidak dapat bereaksi dengan benda kerja/ yang akan dilas.
e. Ketangguhan yang baik.
f. *Thermal Expansion* yang rendah.
g. *Machinability* yang baik.
h. Mikrostruktur yang homogen.

Terdapat dua bagian utama dari sebuah *tool* yang digunakan pada proses *friction stir welding*, yaitu *shoulder* dan *probe/pin*. *Shoulder* adalah bagian yang membangun panas dengan gesekan yang dilakukan terhadap benda kerjaa dan mampu menjadi bagian penahan material panas yang ada di bawahnya. Dan juga, memberikan gaya vertical ke arah benda kerja yang menjaga kondisi *contact tool* dengan benda kerja. Pin/Nib/Probe adalah bagian yang melakukan penetrasi ke dalam

benda kerja di mana bagian tool inilah yang mengaduk material atau mengalirkan material yang sudah melunak akibat panas yang dihasilkan *shoulder* sehingga dapat menciptakan suatu sambungan antara dua material. Dan untuk ukuran desain lain seperti ukuran *tool*, diameter *shoulder*, diameter *probe*, panjang *probe* dan panjang *tool* secara keseluruhan diatur sesuai dengan proses pengelasan yang akan dilakukan dengan melibatkan parameter ketebalan benda kerja, kemiringan *tool* pada saat proses, kekuatan sambungan nantinya yang diharapkan serta *clearance* antar benda kerja yang dilas. (ASM, 2007)



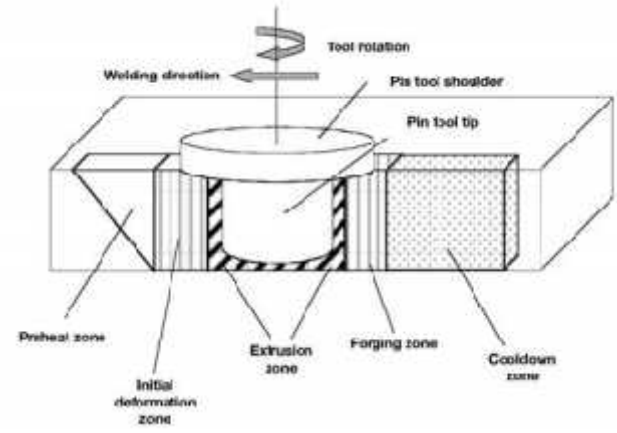
Gambar 2.15 Jenis *Tool* yang digunakan pada *Friction stir welding* (ASM, 2007)

Proses *friction stir welding* melibatkan adanya beban mekanikal, sehingga menimbulkan gaya-gaya yang bekerja pada *tool* terhadap bidang yang akan dilas. Gaya-gaya tersebut adalah :

1. *Downward Force*, gaya yang diberikan oleh mesin kepada *tool* yang diteruskan ke benda kerja dan berfungsi untuk menjaga kontak antara *tool* dengan benda kerja sehingga tingkat penetrasi dan panas yang dihasilkan tetap terjaga selama proses pengelasan berlangsung.

2. *Traverse Force*, gaya yang bekerja paralel dengan gerakan translasi dari *tool* dan merupakan gaya positif yang dihasilkan akibat gerakan translasi dari *tool* itu sendiri.
3. *Lateral Force*, gaya yang begerak tegak lurus dengan arah gerak translasi dari *tool*, hal ini timbul karena adanya kemiringan *tool*.
4. *Torque*, sejumlah gaya yang timbul akibat adanya gerak rotasi *tool* dan resistansi material pada proses pengelasan berlangsung. (ASM, 2007)

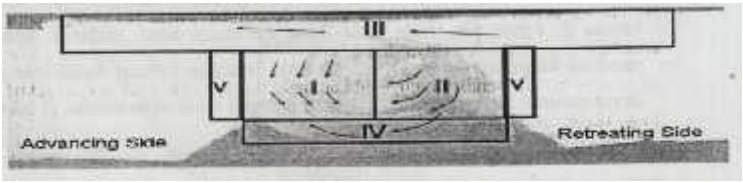
Dalam proses *friction stir welding* terdapat pembagian zona berdasarkan fase pembentukan sambungan sepanjang *joint line*. Telah dijelaskan dalam prinsipnya, bahwa penyambungan material dilakukan dengan kombinasi proses pengadukan dan penempaan material yang telah melunak akibat panas yang dihasilkan dari gesekan *tool* dengan material. Pembagian zona proses dalam *friction stir welding* ditunjukkan pada gambar 2.16 di bawah ini.



Gambar 2.16 Zona Proses Metalurgi pada *Friction stir welding* (ASM, 2007)

a. Zona Pemanasan Awal (*preheat zone*)
   Penetrasi *tool* ke dalam material ketika berotasi menimbulkan gesekan dengan material sehingga menghasilkan pemanasan awal pada daerah depan tool yang searah pergerakan tool sepanjang joint line sehingga terbentuklah zona pemanasan awal.
b. Zona Deformasi Awal (Initial Deformation Zone)
   Zona ini letaknya di belakang zona pemanasan awal dan tepat berada di depan *tool*. Pada zona deformasi awal, material dipanaskan melebihi temperature kritisnya dan besar tegangan di atas critical flow stress material itu sendiri, menyebabkan material lunak akan teraduk di sekitar *tool*.
c. Zona Ekstrusi (Extrusion Zone)
   Pada zona ini material telah melunak di bagian depan *tool* akan dipindahkan dan terdeposit menuju bagian belakang sembari *tool* bergerak maju. Hal ini dapat terjadi akibat putaran *tool* dan pergerakan translasi *tool* sepanjang *joint line*.
d. Zona Tempa (Forging Zone)
   Pada zona tempa, material lunak yang telah berpindah dari bagian depan *tool* menuju belakang tool serta mendapatkan efek tempat dari bagian bawah shoulder tool dan backing plate, efek tempa ini dikarenakan tekanan dari shoulder tool yang memadatkan material lunak yang teraduk oleh tool. Efek tempa ini akan mengalami peningkatan apabila tool diberikan sudut kemiringan dengan kisaran $1\text{-}4^0$, karena terdapat sedikit penambahan bagian shoulder tool yang ikut tercelup dibawah permukaan material.
e. Zona Post Weld
   Setelah mengalami proses penempaan, material yang telah teraduk kemudian perlahan mulai mendingin dan pada zona ini mulai terbentuk sambungan material yang solid dengan tergantung parameter yang digunakan.

Aliran logam selama proses pengelasan *friction stir welding* memiliki zona tersendiri yang telah diidentifikasi oleh Pedro. Di mana terdapat 5 pembagian zona yang di antaranya :



Gambar 2.17 Zona Aliran Logam pada *Friction Stir Welding* (Pedro, 2005)

a. Zona I dan II
   Zona ini merupakan zona ekstrusi untuk *advancing side* dan *retreating side* dan terletak di sekitar TMAZ dan HAZ.
b. Zona III
   Zona ini adalah zona *flow arm* yang terletak di bagian atas sambungan las, pada zona ini material yang telah melunak tertarik oleh *tool* dari *retreating side* dan terkumpul membentuk deposit pada *advancing side*.
c. Zona IV
   Zona ini merupakan zona pusaran (swirl zone) dari aliran material yang berada di sekitar *tool* bagian bawah atau terletak pada weld metal.
d. Zona V
   Zona V merupakan zona yang terletak di sisi sebelah luar zona I dan zona II yang terletak di base metal.

Metode *friction stir welding* memiliki beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan metode pengelasan lain, di antaranya adalah :

- Aspek Metalurgi
  a. Proses terjadi pada fasa solid.
  b. Distorsi yang dihasilkan rendah.
  c. Tidak ada unsur paduan yang hilang.
  d. Sifat mekanik yang baik pada daerah lasan.
  e. Rekristalisasi struktur mikro halus.
  f. Mampu mengelas semua material, terutama aluminium.

- Aspek Lingkungan
  a. Tidak memerlukan gas inert.
  b. Meminimalisir proses pembersihan permukaan.
  c. Mengurangi material *consumable*.
  d. Tidak menghasilkan emisi yang berbahaya.

- Aspek Energi
  a. Memperbaiki penggunaan material.
  b. Konsumsi energi rendah.
  c. Mengurangi konsumsi bahan bakar karena mengurangi volume benda/kendaraan yang dilas. (ASM, 2007)

Selain yang telah disebutkan, kelebihan dari *friction stir welding* adalah :

1. Kebersihan permukaan sambungan tidak diperlukan, karena selama proses *friction* permukaan akan terkelupas dan terdeformasi kebagian luar.
2. Tidak memerlukan logam pengisi, pelindung flux dan gas pelindung selama proses
3. Tidak terdapat cacat akibat fenomena pencairan dan pembekuan.
4. Dimungkinkan untuk menyambung dua material logam yang berbeda.
5. Ongkos pengerjaan lebih ringan.

Dan beberapa kekurangan yang ada di antaranya :

1. Benda yang disambung harus simetris
2. Proses umunya terbatas pada permukaan plat dan bentuk batang bulat.
3. Salah satu material yang disambung harus memiliki sifat mampu dideformasi secara plastis (Messler, 1999)

2.6 Cacat Las

Pada proses *friction stir welding* terdapat ketidaksempurnaan dikarenakan parameter pengelasan yang digunakan tidak sesuai, sehingga hasil yang diinginkan kurang maksimal. Berikut beberapa kemungkinan *defect* yang dapat terjadi :

1. *Channel Defect*

   Terjadinya *channel defect* akan sulit dikendalikan apabila material yang akan disambung memiliki kuat panas yang tinggi serta konduktivitas termal yang rendah. Pada *friction stir welding* umumnya jika terjadi kecacatan ini maka akan ditemukan pada daerah sekitar *advancing side*. *Channel defect / wormhole / tunnel defect* adalah salah satu jenis ketidaksempurnaan yang paling sering terjadi pada pengelasan dengan metode *friction stir welding*. Cacat ini merupakan ketidaksempurnaan volumetric di sepanjang sambungan las yang terjadi akibat temperature yang dihasilkan terlalu tinggi hingga mendekati titik lebur. Dengan adanya cacat ini, tentu sangat berpengaruh pada kekuatan tarik dan elongasi yang menurun cukup besar. Selain temperature, *channel defect* juga dapat terjadi akibat sudut kemiringan yang terlalu kecil dan kurangnya tekanan tempa dari *tool*.

2. *Voids*

   Void dapat terbuka hingga ke permukaan meskipun sangat jarang terjadi, fenomena ini disebut dengan *surface breaking*. Fenomena ini juga dapat terjadi akibat plat yang akan disambung bergerak relative satu sama lain atau ketika *tool* yang digunakan terangkat. Seperti halnya *channel defect*, *voids* bersifat volumetrik yang merupakan ketidaksempurnaan berupa timbulnya rongga pada sambungan las. Namun *voids* tidak terjadi sepanjang *joint line*, tetapi *intermittent* yaitu hanya pada bagian tertentu saja cacat ini terjadi.

3. *Lack of Penetration*

   Penyebab terjadinya kecacatan ini adalah kurang memadainya penetrasi pin pada material, hal ini sebagai implikasi dari kurang panjangnya *tool* ataupun akibat terlalu besarnya sudut kemiringan. Selain itu, *lack of penetration* dapat terjadi karena *miss alignment* benda kerja. Seperti halnya cacat yang lain, *lack of penetration* sering terjadi pada konfigurasi pengelasan *butt joint* dan terjadi pada bagian *root* dari sambungan.

BAB III
METODOLOGI

3.1 Bahan Penelitian

Bahan bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. Aluminium Paduan seri 5083 H116
2. Baja Perkakas tipe HSS Co8
3. Aquades
4. HF
5. Resin

3.2 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

1. Mesin Frais/milling
   Digunakan sebagai mesin yang dimodifikasi penggunaannya untuk memutar *tool* dalam *friction stir welding*.

Gambar 3.1 Mesin Frais

2. Mesin Bubut
   Digunakan untuk membentuk *tool* sesuai dimensi yang telah ditentukan.

Gambar 3.2 Mesin Bubut

3. Cutting Tool
   Digunakan untuk memotong plat dan spesimen-spesimen kecil dalam pengujian struktur mikro.

4. Kertas Amplas
   Digunakan untuk meratakan permukaan plat dan untuk proses *grinding* dalam pengujian struktur mikro.

5. Gerinda
   Untuk memotong plat logam aluminium sesuai dimensi yang telah ditentukan.

Gambar 3.3 Gerinda

6. Kamera Digital
   Digunakan untuk mengambil gambar hasil pemeriksaan visual dan dokumentasi.

7. Mesin Uji Kekerasan
   Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji.

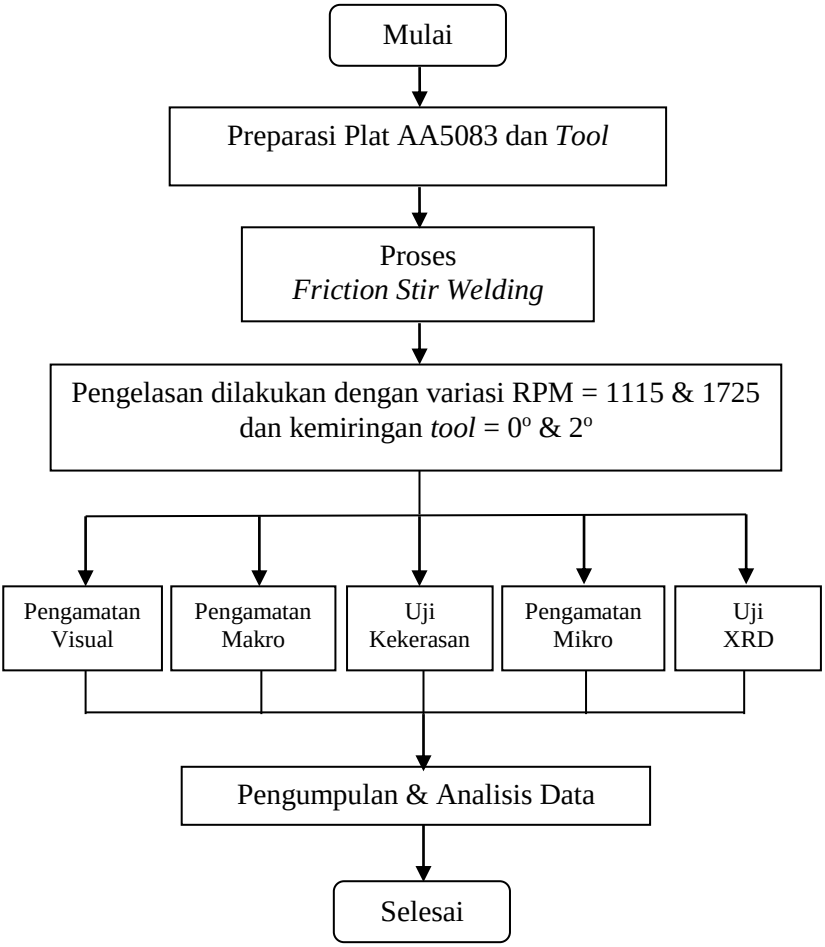
Gambar 3.4 Mesin Uji hardness

8. Mikroskop Metalurgi
   Digunakan untuk mengetahui struktur mikro yang terjadi pada daerah hasil pengelasan.

Gambar 3.5 Mikroskop Metalurgi

3.3 Diagram Alir

Berikut merupakan diagram alir yang digunakan dalam penelitian ini.



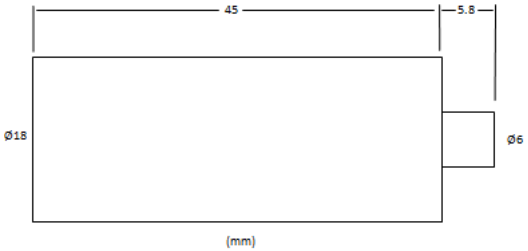
Gambar 3.6 Diagram Alir Penelitian

3.4 Prosedur Penelitian

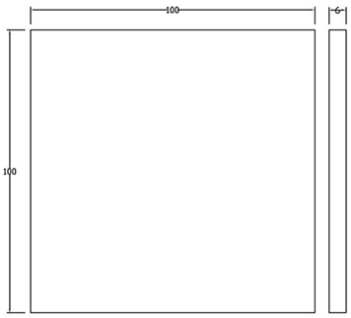
3.4.1 Preparasi *Tool* dan Material

Baja yang digunakan sebagai *tool* pada penelitian *friction stir welding* adalah baja tipe HSS Co8. Material jenis tersebut mampu digunakan pada proses berkecepatan tinggi dan sifat mekaniknya baik dalam temperatur yang tinggi. Dalam pembentukannya digunakan mesin bubut untuk mencapai dimensi yang diharapkan.

Material yang akan dilas adalah aluminium seri 5083 dalam bentuk berupa plat. Plat yang masih berukuran besar kemudian dipotong dengan ukuran 100 x 100 x 6 mm sebanyak 8 buah menggunakan *cutting tool*. Untuk meratakan permukaan spesimen digunakan gerinda tangan agar selama proses pengelasan berjalan dengan baik.



Gambar 3.7 Dimensi *Tool* yang Digunakan



Gambar 3.8 Dimensi Plat Aluminium 5083

3.4.2 Proses *Friction Stir Welding*

Pengelasan dalam keadaan solid secara *friction stir welding* dilakukan secara *butt joint*. Pada penelitian ini digunakan dua parameter yaitu kecepatan putaran (RPM) dan kemiringan *tool*. Permukaan dari dua plat yang akan dilas harus dihaluskan terlebih dahulu dengan menggunakan mesin frais. Kemudian, dua plat tersebut diletakkan di *backing plate* secara rapat. *Tool* yang akan digunakan untuk mengelas diletakkan tepat di atas dua plat dan posisinya berada di awal titik pengelasan. Kemudian *tool* tersebut berputar dan penetrasi di antara dua plat hingga *shoulder* dari *tool* menyentuh plat dengan *dwell time* selama 30s. Selanjutnya *tool* bergerak maju searah *weld joint* dengan kecepatan las 1mm/s hingga di titik akhir pengelasan dan *tool* yang masih berputar diangkat kembali. Proses pengelasan diulangi pada material yang baru dengan parameter yang berbeda.

3.4.3 Pembuatan Spesimen untuk Pengujian

Hasil plat yang telah dilas kemudian dipotong melintang (*cross section*) untuk selanjutnya dilakukan *mounting* menggunakan resin. Kemudia diratakan dengan kikir dan diamplas untuk dilakukan makro etsa menggunakan larutan HF dan selanjutnya pengamatan secara mikro. Setelah itu, dilakukan uji kekerasan pada tiap daerah hasil lasan untuk mengetahui distribusi kekerasan yang dihasilkan.

3.4.4 Pengujian

Setelah proses pengelasan telah dilakukan, beberapa pengamatan dan pengujian terhadap spesimen hasil *friction stir welding* adalah sebagai berikut :

a. Pengamatan Visual

Tiap spesimen hasil pengelasan dengan metode *friction stir welding* difoto dengan menggunakan kamera digital. Pegambilan foto dilakukan untuk spesimen secara utuh

dan penampang melintang. Hasil pengamatan ini kemudian dianalisis.

b. Pengamatan Makro

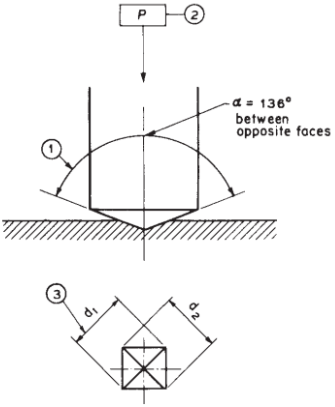
Tiap spesimen hasil pengelasan dengan metode *friction stir welding* difoto dengan menggunakan kamera digital. Pegambilan foto dilakukan untuk spesimen secara utuh dan penampang melintang. Hasil pengamatan ini kemudian dianalisis.

c. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan yang dilakukan yakni pengujian kekerasan dengan metode vicker. Pengujian kekerasan Vickers tepat dilakukan untuk material yang lunak seperti pada aluminium. Pengujian kekerasan vicker dilakukan sesuai dengan standar ASTM E92. Indentor yang digunakan adalah intan dengan bentuk piramida. Dengan pembebanan sebesar 100 kgf. Dari pengujian yang dilakukan didapatkan diameter indentasi yang kemudian dimasukkan ke dalam persamaan

$$VHN = \frac{1.854\,P}{d^2}$$

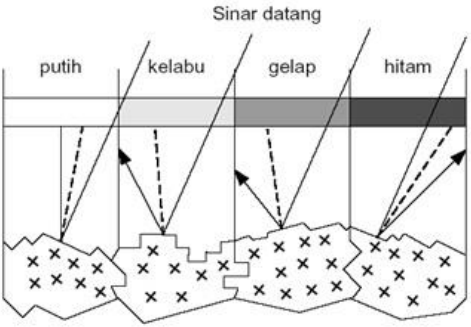
Dimana P adalah beban indentasi dan d adalah rata-rata dari pengukuran diagonal indentasi



Gambar 3.9 Uji Kekerasan Vickers

d. Pengamatan Struktur Mikro (Metalografi)

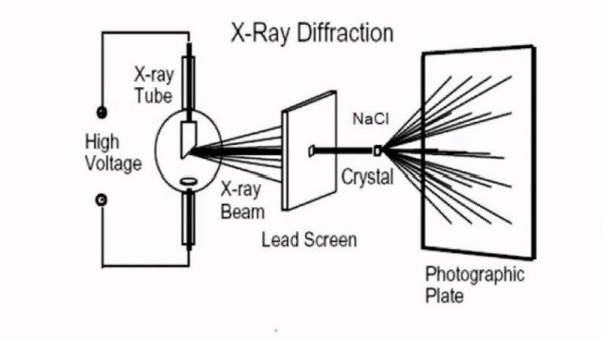
Pengujian metalografi dilakukan berdasarkan pada perbedaan intensitas sinar pantul permukaan logam yang masuk kedalam mikroskop sehingga terjadi gambar yang berbeda (gelap, agak terang, terang) seperti pada Gambar 3.9. Apabila terhadap permukaan logam yang telah dihaluskan (polish) kemudian di etsa dengan larutan kimia, maka permukaan logam tersebut akan dilarutkan. Struktur mikro yang berbeda akan dilarutkan dengan kecepatan yang berbeda sehingga meninggalkan bekas permukaan dengan orientasi sudut yang berbeda pula. Dengan demikian apabila seberkas sinar dikenakan pada permukaan logam yang telah di test maka sinar tersebut akan dipantulkan sesuai dengan orientasi sudut permukaan bidang yang terkena.



Gambar 3.10 Alur Pantul Sinar Pada Metalografi

e. Pengujian XRD (X-Ray Diffraction)

Difraksi sinar X merupakan instrumen yang digunakan untuk mengidentifikasi material kristalit maupun non-kristalit, sebagai contoh identifikasi struktur kristalit (kualitatif) dan fasa (kuantitatif) dalam suatu bahan dengan memanfaatkan radiasi sinar X seperti pada Gambar 3.10. Dengan kata lain, teknik ini digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta untuk mendapatkan ukuran partikel.



Gambar 3.11 Prinsip kerja XRD

Sinar-X dihasilkan di suatu tabung sinar katode dengan pemanasan kawat pijar untuk menghasilkan elektron-elektron, kemudian electron-elektron tersebut dipercepat terhadap suatu target dengan memberikan suatu voltase, dan menembak target dengan elektron. Ketika elektron-elektron mempunyai energi yang cukup untuk mengeluarkan elektron-elektron dalam target, karakteristik spektrum sinar-X dihasilkan. Spektrum ini terdiri atas beberapa komponen-komponen, yang paling umum adalah Kα dan Kβ. Kα berisi, pada sebagian, dari Kα1 dan Kα2. Kα1 mempunyai panjang gelombang sedikit lebih pendek dan dua kali lebih intensitas dari Kα2. Panjang gelombang yang spesifik merupakan karakteristik dari bahan target (Cu, Fe, Mo, Cr). Disaring, oleh kertas perak atau kristal monochrometers, yang akan menghasilkan sinar-X monokromatik yang diperlukan untuk difraksi.

(halaman sengaja dikosongkan)

BAB IV
ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

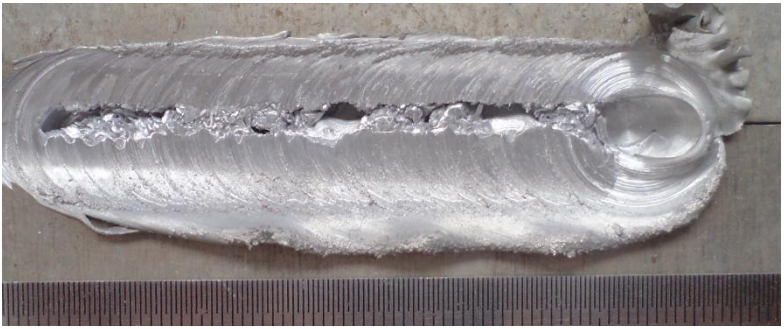
4.1.1 Hasil Pengamatan Visual Tampak Atas

Dari hasil pengelasan *friction stir welding* yang dilaksanakan berdasarkan parameter yang telah ditentukan, didapatkan hasil pengamatan tampak permukaan atas sebagai berikut.

Gambar 4.1 Hasil Tampak Atas Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 0^o

Gambar 4.2 Hasil Tampak Atas Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 2^o

Gambar 4.3 Hasil Tampak Atas Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 0^o



Gambar 4.4 Hasil Tampak Atas Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 2^o

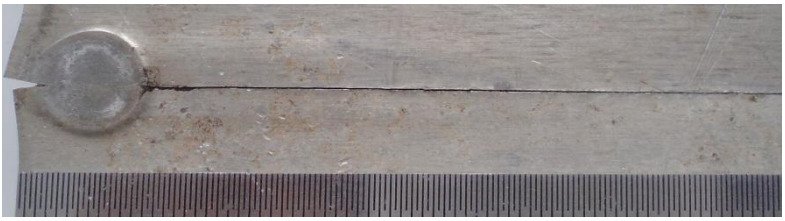
Hasil pengelasan dengan metode *friction stir welding* menghasilkan penampakan atas yang berbeda karena pengaruh kecepatan putaran dan sudut yang diberikan selama proses pengelasan berlangsung sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.1, 4.2, 4.3 dan 4.4. Pada semua parameter pengelasan menunjukkan ketidaksempurnaan *fusion* pada daerah adukan las yang tidak teraduk secara sempurna untuk membentuk *joining* yang terlihat jelas pada gambar 4.2 di mana daerah lasannya tidak terbentuk. Hal ini dikarenakan hasil adukan yang seharusnya

membentuk *joining* justru melebur dan teraduk ke atas dan keluar di permukan bidang plat yang dilas.

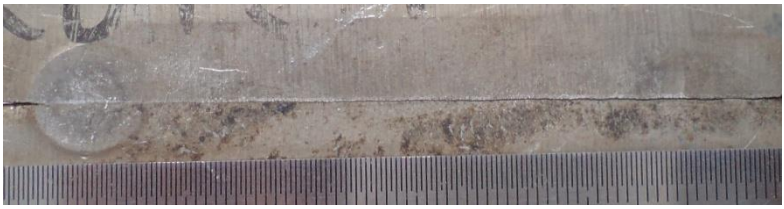
4.1.2 Hasil Pengamatan Visual Tampak Bawah

Dari hasil pengelasan *friction stir welding* yang dilaksanakan berdasarkan parameter yang telah ditentukan, didapatkan hasil pengamatan visual tampak bawah (*root*) sebagai berikut :

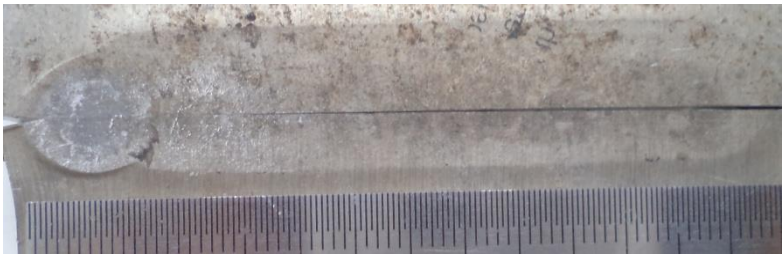
Gambar 4.5 Hasil Tampak Bawah Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 0^o



Gambar 4.6 Hasil Tampak Bawah Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 2^o



Gambar 4.7 Hasil Tampak Bawah Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 0^o

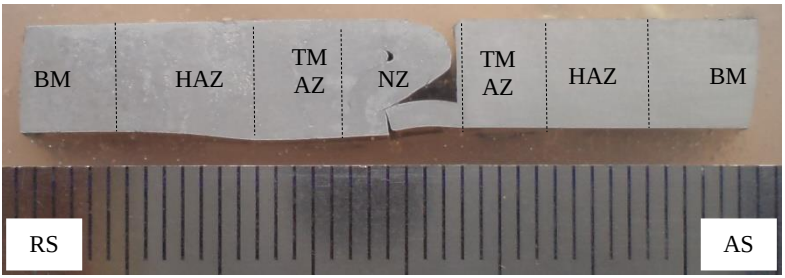


Gambar 4.8 Hasil Tampak Bawah Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 2^o

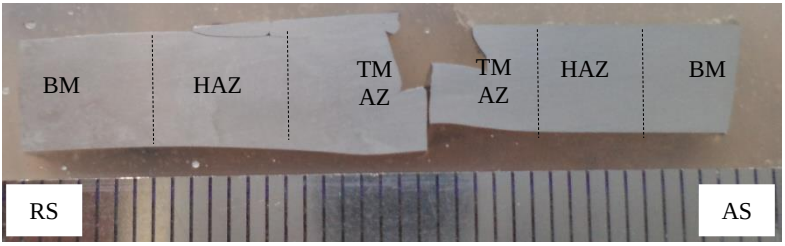
Hasil pengelasan dengan metode *friction stir welding* menghasilkan penampakan bawah yang berbeda tiap parameter yang dikenakan pada proses pengelasan. Pada semua proses pengelasan menunjukkan bahwa pada titik awal pengelasan terdapat bekas penetrasi awal *tool* pada bidang yang telah dilas sehingga ujung plat melebar diakibatkan tekanan dari *tool* di mana hal ini ditampilkan dalam gambar 4.5, 4.6 dan 4.8. Sedangkan dalam gambar 4.7 terlihat ujung plat pengelasan awal yang lebih rapi disbanding parameter lainnya. Pada sepanjang *joint line* tidak menyambung secara sempurna dengan masih terlihatnya celah dari dua sisi plat yang telah dilas.

4.1.3 Hasil Pengamatan Makro Etsa

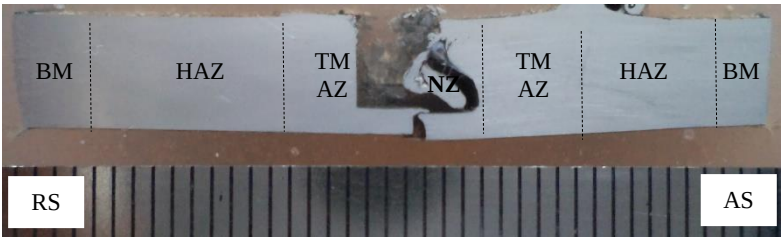
Dari hasil pengelasan *friction stir welding* yang dilaksanakan berdasarkan parameter yang telah ditentukan, didapatkan hasil pengamatan makro sebagai berikut :



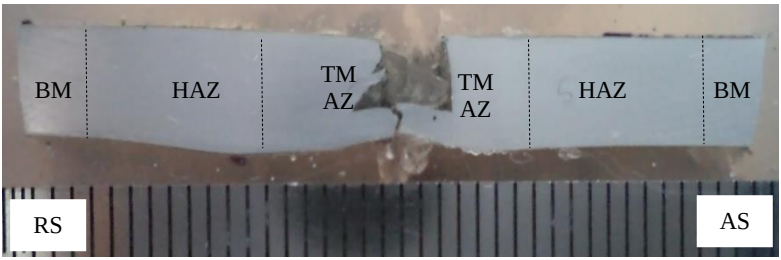
Gambar 4.9 Struktur Makro Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 0^o



Gambar 4.10 Struktur Makro Pengelasan dengan RPM 1115 dan sudut 2^o



Gambar 4.11 Struktur Makro Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 0^o



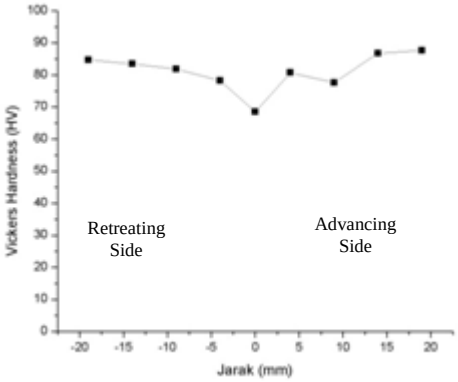
Gambar 4.12 Struktur Makro Pengelasan dengan RPM 1725 dan sudut 2^o

Dari pengamatan struktur makro terlihat bahwa daerah adukan terlihat tidak terwujud secara sempurna. Hanya pada parameter dengan sudut 0^o pada gambar 4.9 dan 4.11 ditemukan hasil adukan meskipun sedikit dan pada paremeter dengan sudut 2^o daerah adukan justru tidak terwujud seperti pada gambar 4.10 dan 4.12. Selain itu pula, terlihat jelas bahwa sambungan las dengan metode *friction stir welding* ini tidak tersambung sempurna. Pada pembagian zona-zona yang dihasilkan, hanya pada gambar 4.9 yang terlihat jelas perbedaan zona perbedaan zonanya dibandingkan parameter lain. Sehingga pembagiannya dibantu melalui pengamatan struktur mikro yang telah dilakukan. Daerah TMAZ dan HAZ pada rpm 1725 terlihat lebih luas dibandingkan dengan rpm 1115 yang disebabkan oleh masukan panas yang lebih tinggi pada rpm 1725. Sedangkan pemberian

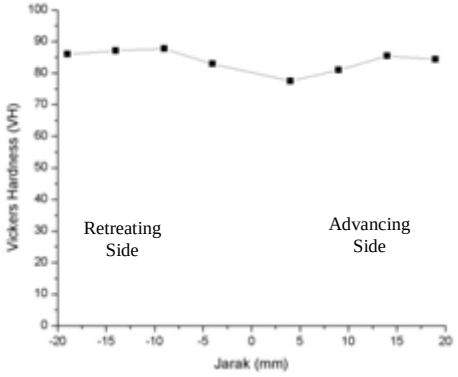
sudut akan menurunkan panas sehingga daerah TMAZ dan HAZ tidak seluas dengan parameter yang tanpa sudut.

4.1.4 Hasil Pengujian Kekerasan

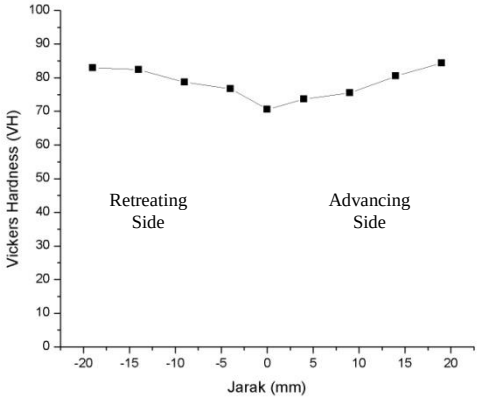
Berikut adalah hasil pengujian kekerasan pada hasil pengelasan dengan metode *friction stir welding* dalam gambar 4.13, 4.14, 4.15 dan 4.16 pada tiap-tiap parameter.



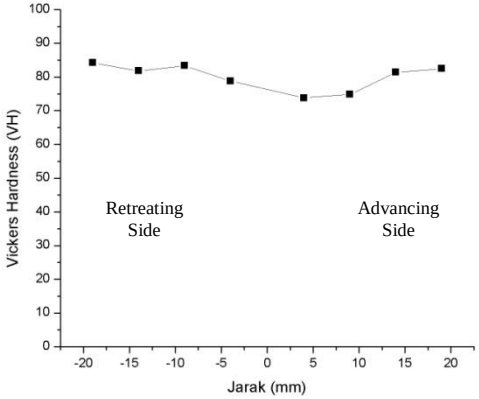
Gambar 4.13 Grafik Distribusi Kekerasan dengan Parameter 1115 rpm dan sudut 0^0



Gambar 4.14 Grafik Distribusi Kekerasan dengan Parameter 1115 rpm dan sudut 2^0

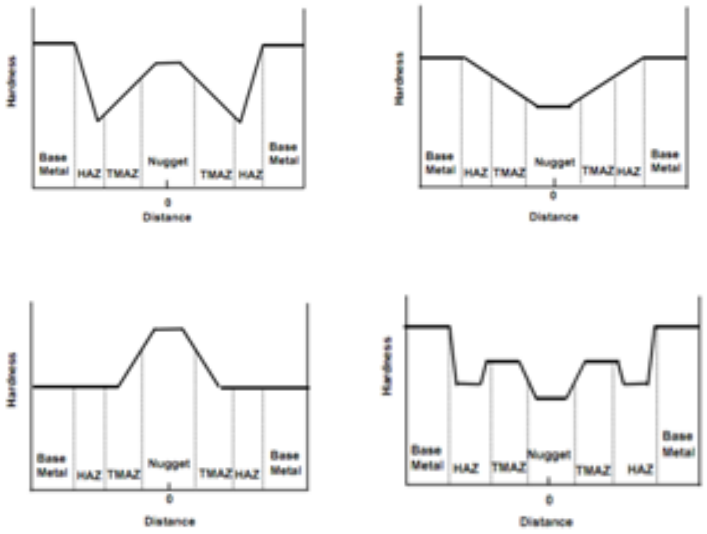


Gambar 4.15 Grafik Distribusi Kekerasan dengan Parameter 1725 rpm dan sudut 0^0



Gambar 4.16 Grafik Distribusi Kekerasan dengan Parameter 1115 rpm dan sudut 2^0

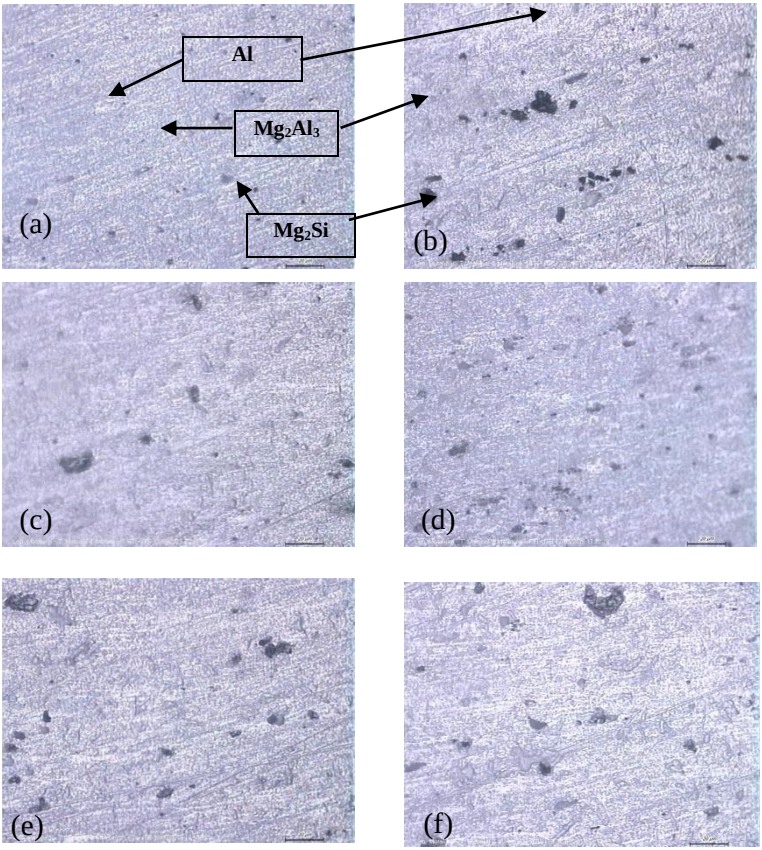
Dari pengamatan distribusi nilai kekerasan dapat dilihat bahwa kekerasan tertinggi ditemukan pada daerah base metal yang jaraknya paling jauh dari zona las. Kemudian nilainya menurun seiring jarak yang mendekati *weld nugget*, di mana pada daerah weld nugget adalah daerah dengan nilai kekerasan yang paling rendah. Di dalam buku *An Outsider Looks At Friction Stir Welding* (Khaled, 2005), grafik distribusi kekerasan secara umum memiliki kecenderungan tipikal yang sama dengan salah satu grafik yang terdapat dalam gambar 4.17.



Gambar 4.17 Tipikal Distribusi Kekerasan pada *Friction Stir Welding* dengan Logam Sejenis (Khaled, 2005)

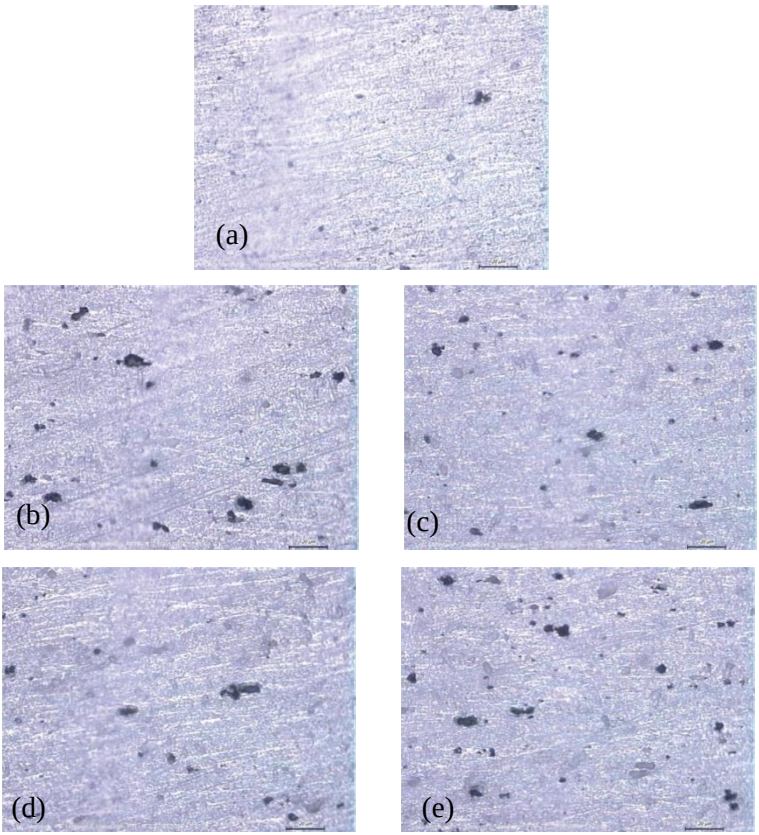
4.1.5 Hasil Pengamatan Struktur Mikro

Dari hasil pengamatan metalografi, maka didapatkan struktur mikro pada daerah BM, HAZ, TMAZ dan NZ. Berikut adalah struktur mikro hasil pengelasan *friction stir welding* pada parameter 1115 rpm dan sudut 0^0 pada perbesaran 500x pada gambar 4.18.



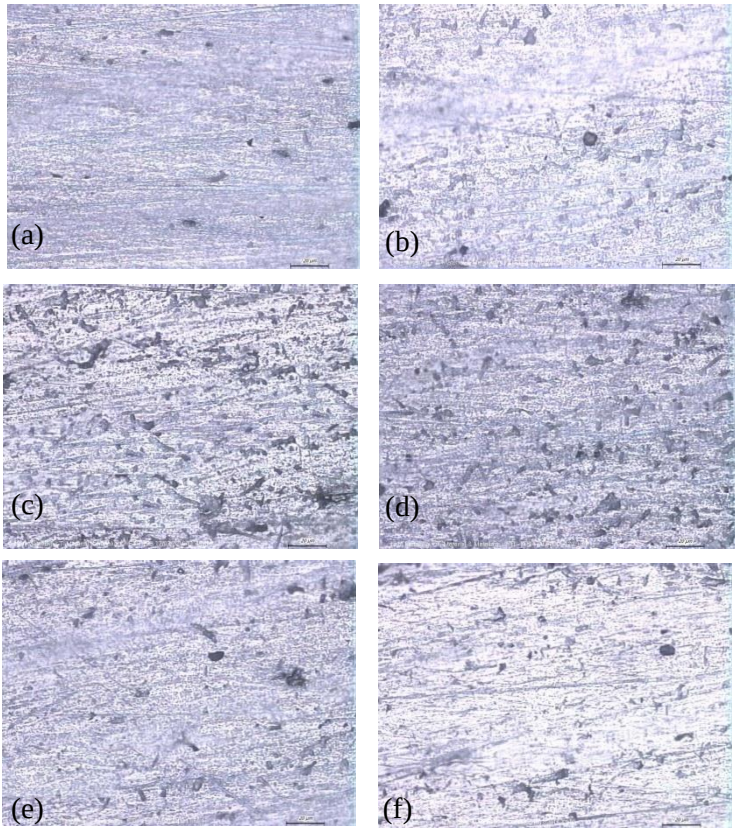
Gambar 4.18 Struktur Mikro pada parameter pengelasan 1115 rpm dan 0^0 pada daerah (a) base metal (b) NZ (c) HAZ sisi RS (d) HAZ sisi AS (e) TMAZ sisi RS (f) TMAZ sisi AS

Berikut adalah struktur mikro hasil pengelasan *friction stir welding* pada parameter 1115 rpm dan sudut 2^0 pada perbesaran 500x dalam gambar 4.18.



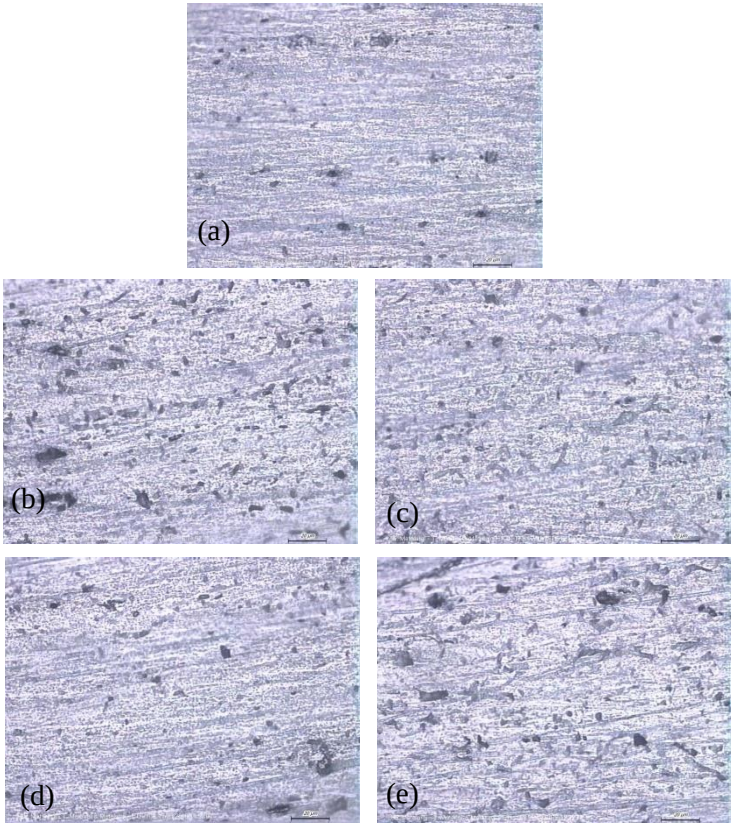
Gambar 4.19 Struktur Mikro pada parameter pengelasan 1115 rpm dan 2^0 pada daerah (a) base metal (b) HAZ sisi RS (c) HAZ sisi AS (d) TMAZ sisi RS (e) TMAZ sisi AS

Berikut adalah struktur mikro hasil pengelasan *friction stir welding* pada parameter 1725 rpm dan sudut 0^0 pada perbesaran 500x pada gambar 4.19.



Gambar 4.20 Struktur Mikro pada parameter pengelasan 1725 rpm dan 0^0 pada daerah (a) base metal (b) NZ (c) HAZ sisi RS (d) HAZ sisi AS (e) TMAZ sisi RS (f) TMAZ sisi AS

Berikut adalah struktur mikro hasil pengelasan *friction stir welding* pada parameter 1725 rpm dan sudut 2^0 pada perbesaran 500x dalam gambar 4.20.

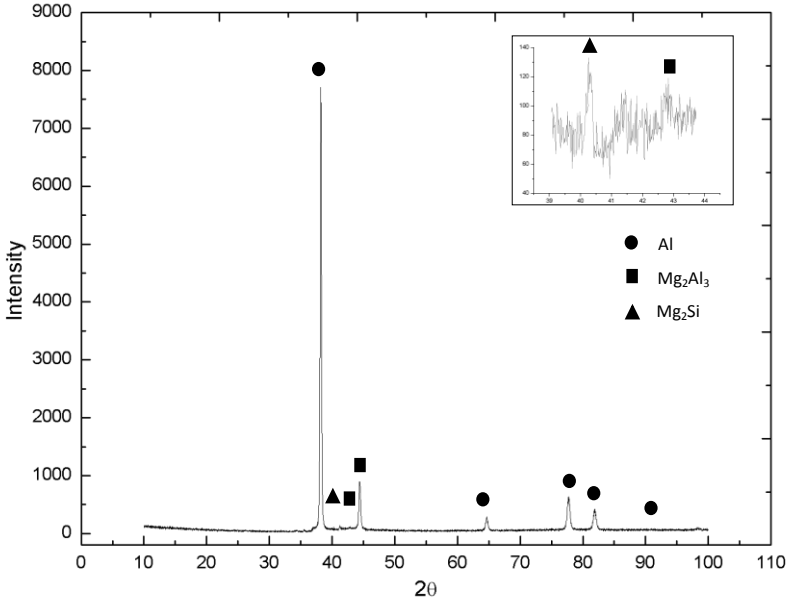


Gambar 4.21 Struktur Mikro pada parameter pengelasan 1725 rpm dan 2^0 pada daerah (a) base metal (b) HAZ sisi RS (c) HAZ sisi AS (d) TMAZ sisi RS (e) TMAZ sisi AS

4.1.6 Hasil Pengamatan Pola XRD

Dalam melakukan pengamatan struktur mikro, kurang tepat jika menunjukkan senyawa/fasa apa saja yang terbentuk dalam material uji. Oleh karenanya diperlukan pengujian tambahan yaitu pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk menentukan secara tepat fasa/senyawa apa saja yang telah ada dan yang baru terbentuk dalam proses *friction stir welding*.

Pengujian XRD dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Material menggunakan PANalytical X'Pert Pro. Material uji yang digunakan adalah sampel daerah TMAZ sisi AS pada rpm 1115 dan 2^0. Pola dari XRD dapat dilihat pada gambar 4.22.



Gambar 4.22 Pola XRD Hasil *Friction Stir Welding*

Analisis pola XRD menunjukkan adanya 9 puncak. Puncak-puncak yang berada pada peak 38.15, 64.67, 77.60, 77.80, 81.86, 98.28 yang menunjukkan Al sesuai dengan ICDD

00-003-0932. Sedangkan pada peak 42.82, 44.39 menunjukkan keberadaan Mg_2Al_3 yang sesuai dengan ICDD 00-001-1132 dan peak 40.25 yaitu Mg_2Si sesuai ICDD 01-074-6835. Hal ini membuktikan bahwa penyusun dari aluminium 5083 adalah Al dan Mg_2Al_3 sesuai dengan diagram fase pada gambar 2.4. Sedangkan munculnya Mg_2Si diakibatkan dari panas yang ditimbulkan selama proses pengelasan berlangsung.

4.2 Pembahasan

Pada penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan putaran dan kemiringan *tool* dalam proses *friction stir welding* terhadap struktur mikro dan nilai kekerasan pada material aluminium 5083 serta mekanisme pembentukan lasan dengan metode *friction stir welding*..

Proses *friction stir welding* dilakukan dengan variasi parameter kecepatan putaran *tool* 1115 dan 1725 rpm, sudut kemiringan *tool* 0 dan 2^o sedangkan parameter tetapnya adalah *welding speed* 1 mm/s atau 60mm/min dan *dwell time* 30s. Untuk *tool* yang digunakan memiliki dimensi diameter pin 6mm dengan panjang 5,8mm dan diameter *shoulder* 18mm dengan panjang 45mm.

Pada pengamatan visual hasil pengelasan, proses *joining* tidak berlangsung sempurna dan hasil adukan tidak terbentuk dengan baik pada semua variasi pengelasan. Hasil adukan yang seharusnya ditempa oleh *shoulder* justru keluar ke permukaan hasil pengelasan. Hal ini terjadi karena material aluminium yang teraduk telah melebur menjadi liquid yang disebabkan tingginya temperature hasil gesekan *tool* dan plat yang melewati titik lebur pada 600 C. Temperatur pada pengelasan dengan metode *friction stir welding* seharusnya berada pada *range* 80-90% dari titik lebur suatu material sehingga dapat dilakukan prose *joining* dalam keadaan padat (Rajamanickam, 2007). Bahkan pada parameter 1115 rpm dengan sudut 2^o yang ditunjukkan pada gambar 4.2, daerah adukan tidak tercipta karena tidak mampunya *tool* untuk penetrasi ke dalam plat secara penuh akibat dari kurangnya daya

mesin milling yang digunakan. Kemudian, untuk pengamatan pada *exit hole* yang ada di ujung akhir *friction stir welding*, lubang terbentuk sempurna pada parameter 1115 rpm dan 0^o. Sedangkan pada parameter lainnya, lubang tidak terbentuk secara sempurna karena tingginya temperatur yang dihasilkan dan menunjukkan bahwa parameter yang digunakan kurang tepat. Untuk pengamatan visual yang tampak bawah, tidak tampak menyatu dan tertutup rapat secara sempurna. Dan pada bagian awal pengelasan, tampak adanya bekas penetrasi dari *tool* yang diakibatkan oleh temperatur yang terlalu tinggi dan *dwell time* yang cukup lama.

Pada pengamatan struktur makro, maka dapat diketahui penampang melintang hasil pengelasan berupa kemungkinan cacat yang ditemukan. Pada pengelasan dengan parameter 1115 rpm dan 0^o, struktur makro menunjukkan adanya cacat *tunnel defect* pada *advancing side* dan *wormhole* di daerah adukan (*nugget zone*). Kemudian pada variasi 1115 rpm dengan sudut 2^o, diapatkan bahwa daerah adukan tidak terbentuk karena adanya cacat berupa *incomplete penetration* sebagai akibat *tool* tidak mampu penetrasi ke plat yang akan dilas secara sempurna. Hal ini dikarenakan mesin milling yang berkerja tidak memiliki daya yang cukup untuk mengaduk plat saat *tool* diposisikan membentuk sudut. Sedangkan pada variasi 1725 rpm dan 0^o, daerah adukan terbentuk meski tidak sempurna dan didapatkan incomplete penetration. Dan untuk parameter 1725 rpm dengan sudut 2^0, daerah adukan terbentuk secara tidak sempurna dan adanya *incomplete penetration* karena temperatur yang dihasilkan terlalu tinggi sehingga daerah yang seharusnya teraduk membentuk *joining*, justru keluar ke permukaan plat yang dilas. Shrivastava dkk (2015) menyatakan bahwa *defect* dalam proses *friction stir welding* yang dihasilkan karena kombinasi yang kurang baik antara kecepatan putaran dan translasi *tool* dapat terjadi sepanjang daerah las (cacat ini sering disebut sebagai *wormhole*). Karena *wormhole* ada di sepanjang daerah lasan, maka rasio volume cacat las adalah sama dengan rasio cacat

daerah penampang lasan terhadap luasan penampang daerah hasil lasan. Sedangkan *void* sering diketemukan pada daerah pusat pengelasan hingga pada *advancing side*. Liu (2015) mengamati proses pembentukan *tunnel defect* pada *friction str welding*. Liu menjelaskan bahwa proses pembentukan nugget zone meliputi beberapa tahapan yaitu yang pertama adalah PAZ (*Pin Affected Zone*), kemudian WBZ (*Weld Bottom Zone*) dan terakhir adalah SAZ (*Stir Affected Zone*). *Tunnel defect* sendiri terjadi pada kurangnya aliran material dari *retreating side* ke *advancing side* di PAZ (yang mungkin disebabkan oleh kecepatan las yang cepat atau kecepatan putaran yang lambat) yang merupakan penyebab utama. Penyebab lainnya adalah kurangnya perpindahan massa ke sisi bawah pada SAZ (yang mungkin disebabkan oleh pemberian gaya yang tidak tepat). Dan waktu di mana hal hal tersebut terjadilah yang menyebabkan terjadi pembentukan *tunnel defect*. Chen (2006) melakukan penelitian tentang pembentukan *defect* pada proses *friction stir welding* pada alumunium paduan 5456 di daerah las *nugget zone* dengan variasi sudut kemiringan *tool*. Hasil pengamatannya menunjukkan bahwa parameter ini sangat penting untuk meraih hasil lasan yang bebas dari adanya cacat. Kemiringan *tool* memiliki pengaruh terhadap panas yang dihasilkan terhadap material dan letak kemungkinan terjadinya *defect* pada daerah pengelasan. Pada sudut kemiringan yang rendah ($\alpha<1,5^0$), material yang teah terdeformasi tidak dapat mengalir dengan baik dan hanya teraduk di area sekitar pin selama proses pengelasan. Sedangkan pada sudut kemiringan yang lebih besar ($\alpha>4,5^0$), *weld flash* akan terbentuk pada *retreating side* dan diketemukan *defect* berupa *cavity* pada *nugget zone*. Banyak peneliti menyatakan bahwa bentuk *nugget zone* ditentukan oleh parameter proses, geometri *tool*, temperatur bidang kerja dan konduktivitas termal material tersebut. Seluruh proses dalam *friction stir welding* tidak simetris antara *advancing side* dan *retreating side* karena masukan panas yang dihasilkan sedikit berbeda, Gan (2013). Su dkk (2013) mengamati bahwa selama proses *friction stir welding* berlangsung akan

menimbulkan gaya torsi *tool*, gaya translasi dan gaya aksial yang dihasilkan secara simultan dari gerakan *tool* yang berotasi dan linear terhadap bidang kerja. Dari hasil pengamatannya menunjukkan putaran *tool* yang semakin tinggi maka torsi pada *tool* justru menurun akan tetapi gaya translasi cenderung meningkat. Sedangkan gaya translasi sendiri berbanding lurus dengan peningkatan *welding speed* dan putaran rotasi, hal ini juga berlaku pengaruhnya pada gaya aksial.

Pada hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan dari tiap daerah zona hasil pengelasan dengan metode *friction stir welding* semakin menurun jika mendekati *nugget zone* di semua parameter pengelasan. Niali kekerasan tertinggi ada di daerah base metal kemudian menurun ke daerah HAZ dan TMAZ. Namun penurunan nilai kekerasan yang terjadi tidaklah sangat signifikan. Khaled (2005) menjelaskan bahwa penurunan nilai kekerasan ini dikarenakan sifat material aluminium AA 5083 H116 yang telah mengalami *strain hardened temper* di mana adanya panas yang cukup tinggi akan membuat rekristalisasi di *nugget zone* akan menurunkan efek dari *cold work*. Dan jika diamati nilai kekerasan terhadap parameter yang digunakan dalam penelitian ini, dapat dilihat bahwa tren peningkatan kecepatan putaran dan penurunan kemiringan *tool* menyebabkan nilai kekerasan cenderung berkurang karena *heat input* yang dihasilkan justru mengalami peningkatan (ASM, 2007) sehingga menghilangkan efek tempa yang telah diterima sebagaimana telah dijelaskan oleh Khaled (2005) sebelumnya

Pada pengamatan struktur mikro, hasil yang didapatkan adalah struktur mikro pada daerah *base metal*, *heat affecte zone*, *termo mechanical affected zone* dan *nugget zone*. Berdasarkan *Atlas Micro Structure of Aluminum*, paduan aluminum 5083 terdiri dari senyawa $(FeMn)_3SiAl_{12}$ yang menyatu dengan matrik putih aluminium dan senyawa Mg_2Al_3. Hal ini didukung oleh hasil pengujian XRD di mana matrik aluminium sangat dominan sehingga $(FeMn)_3SiAl_{12}$ tidak terdeteksi karena intensitasnya yang sangat sedikit. Dari hasil pengamatan menunjukkan bahwa

karena adanya panas pada proses pengelasan ini maka terbentukah Mg_2Si pada bagian daerah pengelasan. Di mana Mg_2Si semakin meningkat menuju ke daerah pusat pengelasan di mana pembentukan Mg_2Si berbanding lurus dengan kenaikan temperatur. Jika dibandingkan antara *advancing side* dan *retreating side*, maka terlihat bahwa Mg_2Si akan lebih banyak diketemukan pada *advancing side*. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan temperarur di mana pada *advancing side* sedikit lebih tinggi dibandingkan retreating side. Semakin tinggi rpm yang digunakan juga meningkatkan panas yang dihasilkan sehingga struktur mikro pada rpm 1725 menghasilkan lebih banyak Mg_2Si dibandingkan dengan rpm 1115. Dan memperhatikan sudut kemiringan yang diberikan, pada sudut 2^o melihatkan Mg_2Si yang cenderung lebih sedikit bila dibandingkan tanpa sudut. Ini disebabkan saat *tool* diberikan sudut dan dipenetrasikan ke material, bidang sentuh untuk menghasilkan gesekan sebagai sumber panas tidak maksimal namun akan memberikan efek tempa yang lebih sehingga menghasilkan struktur mikro Mg_2Si yang lebih pipih sebagai efek tempa yang diberikan oleh *tool*.

Shi dkk (2015) mengamati bahwa gerakan rotasi dan translasi secara simultan menciptakan distribusi temperatur yang asimetris di antara dua sisi material yang dilas yang menyebabkan akan terjadinya perbedaan struktur mikro dan sifat mekanik antara *advancing side* dan *retreating side*. Ketidaksimetrisan inilah yang merupakan karakteristik tersendiri dalam pengelasan dengan metode *friction stir welding*. Selama proses *friction stir welding* berlangsung, putaran torsi yang tinggi dan gaya tekan dibutuhkan untuk melunakkan material dan membentuk daerah lasan yang baik. Tegangan tinggi yang diberikan pada *tool* dapat menyebabkan kegagalan prematur terhadap *tool* yang digunakan. Di samping itu, kecepatan tangensial yang tinggi yang pada *shoulder* yang bergesekan mungkin menyebabkan panas berlebih (*over heating*) atau *incipient melting* di sepanjang daerah pengelasan (*joint line*) yang mengarah pada degradasi sifat

mekanik (kekuatan tarik), terutama pada paduan aluminium dengan pengerasan presipitasi.

Pada proses pemanasan membuat Mg larut dalam kristal Al yang berbentuk FCC. Kemudian saat proses pendinginan berlangsung, batas kelarutan Mg di dalam Al sendiri menurun dan sisa-sisa Mg ini akan ke luar dan selanjutnya berikatan dengan Si sehingga membentuk senyawa baru Mg_2Si. Oleh karena itu, daerah yang paling terkena panas tinggi akan memiliki senyawa Mg_2Si lebih banyak dan dalam struktur mikro tampak seperti butiran hitam, Tranggono (2011)**.**

Demikian hasil analisis dan pembahasan dari studi eksperimental *friction stir welding* yang telah dilakukan berdasarkan parameter yang telah ditentukan.

LAMPIRAN

Lampiran A

Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Variasi 1115 rpm dan 0^0

jarak	d1	d2	drata2	VHN	side
19	1.45	1.509	1.480	84.7	RS
14	1.48	1.5	1.490	83.5	
9	1.505	1.505	1.505	81.9	
4	1.564	1.514	1.539	78.3	
0	1.641	1.65	1.646	68.5	NZ
4	1.586	1.445	1.516	80.7	AS
9	1.591	1.5	1.546	77.6	
14	1.523	1.4	1.462	86.8	
19	1.491	1.418	1.455	87.6	

Variasi 1115 rpm dan 2^0

jarak	d1	d2	drata2	VHN	side
19	1.495	1.441	1.468	86.0	RS
14	1.45	1.468	1.459	87.1	
9	1.453	1.455	1.454	87.7	
4	1.468	1.523	1.496	82.9	
4	1.566	1.527	1.547	77.5	AS
9	1.495	1.532	1.514	80.9	
14	1.455	1.491	1.473	85.4	
19	1.464	1.501	1.483	84.4	

Variasi 1725 rpm dan 0^0

jarak	d1	d2	drata2	VHN	side
19	1.489	1.501	1.495	83.0	RS
14	1.471	1.529	1.500	82.4	
9	1.52	1.55	1.535	78.7	
4	1.561	1.548	1.555	76.7	
0	1.6	1.64	1.620	70.6	NZ
4	1.602	1.571	1.587	73.7	AS
9	1.594	1.54	1.567	75.5	
14	1.531	1.504	1.518	80.5	
19	1.493	1.472	1.483	84.4	

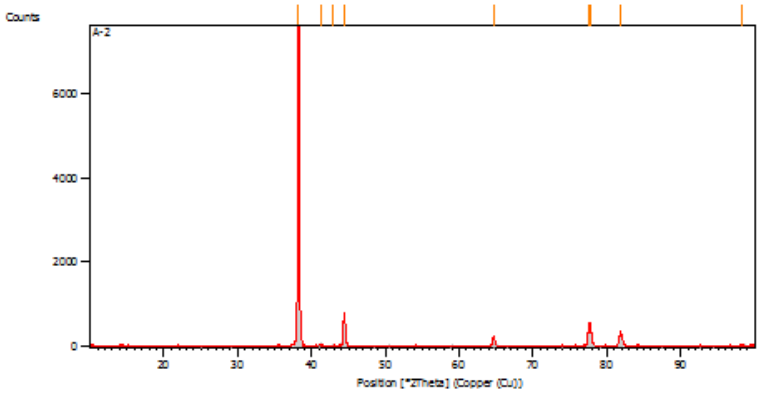
Variasi 1725 rpm dan 2^0

jarak	d1	d2	drata2	VHN	side
19	1.478	1.489	1.484	84.2	RS
14	1.491	1.52	1.506	81.8	
9	1.502	1.48	1.491	83.4	
4	1.531	1.536	1.534	78.8	
4	1.579	1.591	1.585	73.8	AS
9	1.576	1.572	1.574	74.8	
14	1.549	1.47	1.510	81.4	
19	1.517	1.482	1.500	82.5	

AS : Advancing Side
RS : Retreating Side
NZ : Nugget Zone

Lampiran B

Hasil Pengujian XRD



Peak List: (Bookmark 3)

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
38.1513	7025.14	0.2342	2.35893	100.00
40.2521	131.14	0.1338	2.18850	0.76
42.8215	118.93	0.4015	2.11186	0.48
44.3983	814.83	0.0836	2.04045	11.60
64.6785	216.71	0.1171	1.44119	3.08
77.6022	462.08	0.2040	1.22929	6.58
77.8006	493.74	0.2342	1.22767	7.03
81.8622	324.25	0.1673	1.17673	4.62
98.2848	24.65	0.6691	1.01930	0.35

Name and formula

Reference code:	00-003-0932
Compound name:	Aluminum
Empirical formula:	Al
Chemical formula:	Al

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
a (Å):	4.0390
b (Å):	4.0390
c (Å):	4.0390
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Volume of cell (10^6 pm^3):	65.89
Z:	4.00
RIR:	-

Status, subfiles and quality

Status:	Marked as deleted by ICDD
Subfiles:	Alloy, metal or intermetalic Inorganic
Quality:	Low precision (O)

Comments

Creation Date:	1/1/1970
Modification Date:	1/11/2011
Deleted Or Rejected By:	Deleted by NBS card.

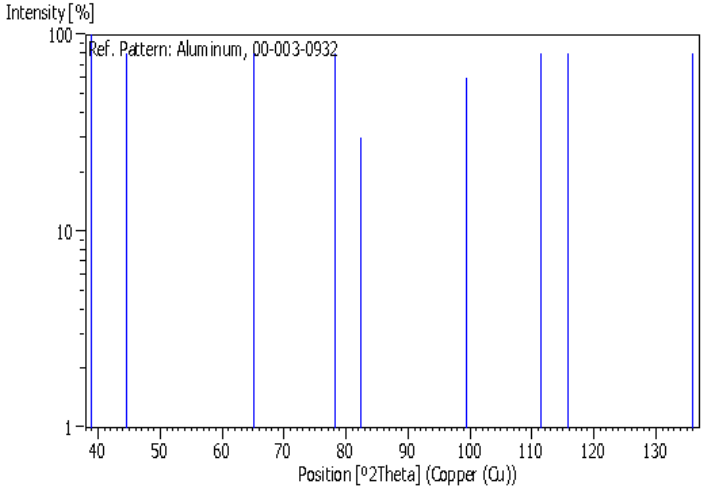
References

Primary reference:	Olshausen., *Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem.,* **61**, 475, (1925)

Peak list

No.	h	k	l	d [A]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	2.32000	38.784	100.0
2	2	0	0	2.03000	44.600	80.0
3	2	2	0	1.43000	65.186	80.0
4	3	1	1	1.22000	78.306	80.0
5	2	2	2	1.17000	82.352	30.0
6	4	0	0	1.01000	99.401	60.0
7				0.93200	111.482	80.0
8				0.90900	115.863	80.0
9				0.83100	135.930	80.0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:	00-001-1132
Compound name:	Magnesium Aluminum
Empirical formula:	Al_3Mg_2
Chemical formula:	Mg_2Al_3

Crystallographic parameters

Crystal system:	Unknown
RIR:	-

Status, subfiles and quality

Status:	Marked as deleted by ICDD
Subfiles:	Alloy, metal or intermetalic Inorganic
Quality:	Low precision (O)

Comments

Creation Date:	1/1/1970
Modification Date:	1/11/2011
Deleted Or Rejected By:	Delete: see Weissmann comments April 1954.

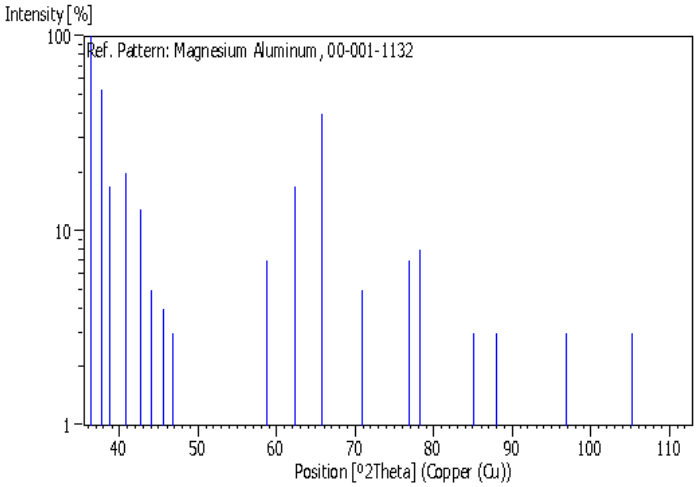
References

Primary reference:	Hanawalt, J., et al., *Anal. Chem.*, **10**, 475, (1938)

Peak list

No.	h	k	l	d [A]	2Theta[deg]	I [%]
1				2.47000	36.343	100.0
2				2.38000	37.768	53.0
3				2.32000	38.784	17.0
4				2.21000	40.798	20.0
5				2.12000	42.612	13.0
6				2.05000	44.142	5.0
7				1.99000	45.547	4.0
8				1.94000	46.789	3.0
9				1.57000	58.765	7.0
10				1.49000	62.260	17.0
11				1.42000	65.703	40.0
12				1.33000	70.785	5.0
13				1.24000	76.809	7.0
14				1.22000	78.306	8.0
15				1.14000	85.017	3.0
16				1.11000	87.889	3.0
17				1.03000	96.811	3.0
18				0.97000	105.145	3.0
19				0.93000	111.845	1.0

Stick Pattern



Name and formula

Reference code:	01-074-6835
Compound name:	Magnesium Silicide
Empirical formula:	Mg_2Si
Chemical formula:	Mg_2Si

Crystallographic parameters

Crystal system:	Cubic
Space group:	Fm-3m
Space group number:	225
a (Å):	6.3510
b (Å):	6.3510
c (Å):	6.3510
Alpha (°):	90.0000
Beta (°):	90.0000
Gamma (°):	90.0000
Volume of cell (10^6 pm^3):	256.17
Z:	4.00
RIR:	4.32

Status, subfiles and quality

Status:	Alternate Pattern
Subfiles:	Alloy, metal or intermetalic
	Common Phase
	ICSD Pattern

	Inorganic
Quality:	Indexed (I)

Comments

ANX:	NO2
Creation Date:	11/19/2008
Modification Date:	1/19/2011
ANX:	NO2
Analysis:	Mg2 Si1
Formula from original source:	Mg2 Si
ICSD Collection Code:	150956
Calculated Pattern Original Remarks:	A from kX
Minor Warning:	No R factors reported/abstracted
Wyckoff Sequence:	c a(FM3-M)
Unit Cell Data Source:	Single Crystal.

References

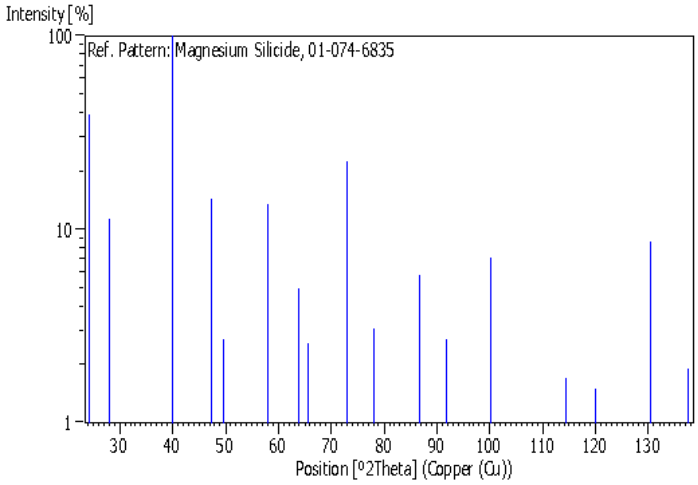
Primary reference:	*Calculated from ICSD using POWD-12++*
Structure:	Klemm, W., Westlinning, H., *Z. Anorg. Allg. Chem.*, **245**, 365, (1941)

Peak list

No.	h	k	l	d [A]	2Theta[deg]	I [%]
1	1	1	1	3.66680	24.253	39.6
2	2	0	0	3.17550	28.077	11.4
3	2	2	0	2.24540	40.126	100.0
4	3	1	1	1.91490	47.440	14.5
5	2	2	2	1.83340	49.688	2.7
6	4	0	0	1.58780	58.043	13.6

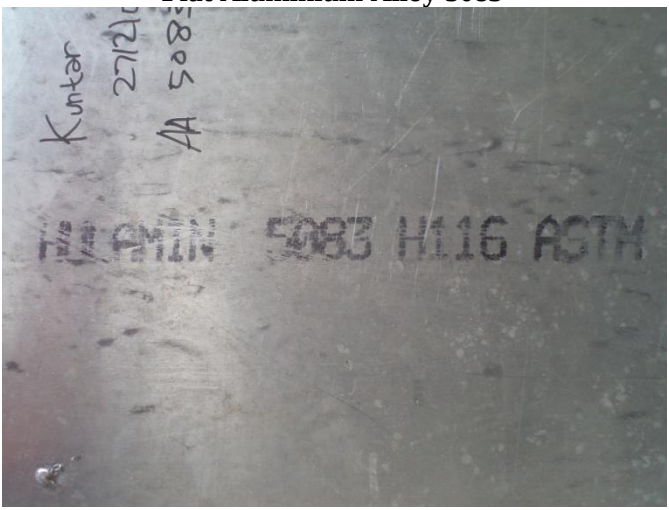
7	3	3	1	1.45700	63.834	5.0
8	4	2	0	1.42010	65.698	2.6
9	4	2	2	1.29640	72.909	22.6
10	5	1	1	1.22220	78.138	3.1
11	4	4	0	1.12270	86.647	5.8
12	5	3	1	1.07350	91.707	2.7
13	6	0	0	1.05850	93.393	0.6
14	6	2	0	1.00420	100.184	7.2
15	5	3	3	0.96850	105.377	0.9
16	6	2	2	0.95740	107.138	0.3
17	4	4	4	0.91670	114.343	1.7
18	7	1	1	0.88930	120.037	1.5
19	6	4	0	0.88070	122.006	0.2
20	6	4	2	0.84870	130.358	8.6
21	7	3	1	0.82680	137.391	1.9

Stick Pattern



Dokumentasi

Plat Aluminium Alloy 5083

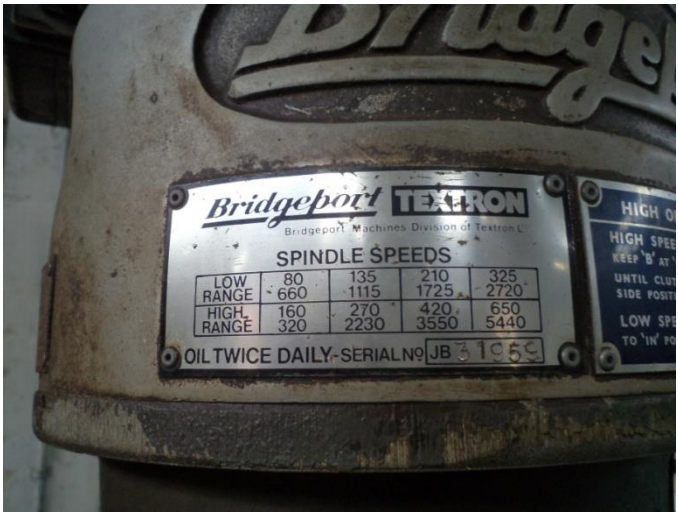


Proses FSW Tampak Belakang

Proses FSW Tampak Samping

Proses FSW Tampak Depan

Kecepatan Putar Pada Mesin Frais



Plat yang Telah Dipreparasi

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Peningkatan kecepatan putaran dan penurunan kemiringan tool menyebabkan sifat mekanik yang cenderung menurun dengan nilai kekerasan vickers terkecil sebesar 70,6 di *nugget zone* pada variasi 1725 rpm dan 0^0. Hal ini disebabkan karena munculnya Mg_2Si pada struktur mikro dan hilangnya efek tempa dari panas yang dihasilkan dalam proses *friction stir welding*.
2. *Friction stir welding* dilakukan dengan menggunakan panas dengan temperatur dibawah titik lebur logam yang akan dilas secara teraduk oleh *tool*. Pengaruh putaran dan kemiringan tool berperan penting dalam proses *friction stir welding* yang menentukan kualitas hasil lasan dan kemungkinan terjadinya *defect* berupa *tunnel defect*, *wormhole* ataupun *incomplete fusion*/*penetration*.

5.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian kali ini adalah :

1. Diperlukan mesin yang memang digunakan untuk proses *friction stir welding* untuk hasil pengelasan yang lebih baik.
2. Perlu penambahan parameter yang lebih kompleks seperti *welding speed*, *dissimilar material* dan jenis *tool* yang digunakan.

(halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

_____, ASM International, 2007. *Friction Stir Welding and Processing*. American Society of Material, Ohio.

_____, 2005. *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International Handbook Committee.

_____, 2005. *ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagram*. ASM International Handbook Committee.

Chen, H.B., Yan, K., Lin, T., Chen, S.B., Jiang, C.Y., Zhao, Z. 2006. *The Investigation of Typical Welding Defects for 5456 Aluminum Alloy Friction Stir Welds*. Journal of Materials Science and Engineering A 433 (2006) 64-69

Frigaard, Grong, dan O.T Midling. 2001. *Metallurgy Material Transaction. A*, Vol 32 (No.5), p 1189-1200

Gan, W.Y., Zhou, Z., Zhang, H., Peng, T. 2013. *Evolution of Microstructure and Hardness of Aluminum after Friction Stir Processing*. Journal of Transaction of Nonferrous Metals Society of China 24 (2014) 975-981

Gungor, B., Kaluc, E., Taban, E., Sik, A. 2013. *Mechanical, Fatigue and Microstructural Properties of Friction Stir Welded 5083-H111 and 6082-T651 Aluminum Alloys*. Materials and Design 56 (2014) 84-90

Hasan, A.F., Bennett, C.J., dan Shipway, P.H., 2015. *A Numerical Comparison of The Flow Behaviour in Friction Stir Welding (FSW) Using Unworn and Worn Tool Geometries*. Material and Design 87 1037-1046

Khaled, T. 2005. *An Outsider Looks At Friction Stir Welding*. California: Report ANM-112N-05-06

Leonard, A.J., Lockyer, S.A. 2003. *Flaws In friction Stir Welds*. United Kingdom

Liu, H.J., Hou, J.C., Guo, H. 2013. *Effect of Welding Speed On Microstructure and Mechanical Propertiesof Self-reacting Friction Stir Welded 6061-T6 Aluminum Alloy*. Journal of Materials and Design 50 (2013) 872-878

Liu, X.C., Wu, C.S. 2015. *Elimination of Tunnel Defect in Ultrasonic Vibration Enhanced Friction Stir Welding*. Journal of Materials and Design 90 (2006) 350-358

Malik, Vinayak., Sanjeev, N.K., Hebbar, H.S., Kailas, S.V., 2014. *Investigations on The Effect of Various Tool Pin Profiles in Friction Stir Welding Using Finite Element Simulations.* Procedia Engineering 97 1060-1068

Musaikan. 2002. *Teknik Las*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Nurdiansyah, F. 2012. *Pengaruh RPM Terhadap Kualitas Sambungan dan Metalurgi Las pada Joint Line untuk Aluminium seri 5083 dengan Proses Friction Stir Welding*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Pedro J, Gimenez Britos. 2005. *Probability Detection In Friction Stir Welding Using Non-Destructive Evaluations Techniques*. Department of Industrial Engineering and The Faculty of Graduate School of Wichita State University

Rajamanickam, N., Balusamy, V. 2007. *Numerical Simulation of Transient Temperature in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 2014 T6*. Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 2, pp. 41-44

Rasyid, I.N., 2015. *Pengaruh Putaran Tool Terhadap Sifat Mekanis dan Korosi pada Sambungan Tak Sejenis Las FSW AA6061-T6 dan AA5083*. Universitas Gajah Mada Yogyakarta

Shi, L., Wu, C.S., Liu, H.J. 2015. *The Effect of The Welding Parameters and Tool Size on The Thermal Process and Tool Torque in Reverse Dual-Rotation Friction Stir Welding*. International Journal of Machine Tools and Manufactur 91 (2015) 1-11

Shrivastava, A., Dingler, C., Zinn, M., Pfefferkorn, F.E. 2015. *Physics-based Interpretation of Tool-workpiece Interface Temperature Signals for Detection Defect Formation During Friction Stir Welding*. Journal of Manufacturing Letters 5 (2015) 7-11

Su, H., Wu, C.S., Pittner, A., Rethmeier, M. 2013. *Simultaneous Measurement of Tool Torque, Traverse Force and Axial Force in Friction Stir Welding*. Journal of Manufacturing Processes 15 495-500

Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Temple-Smith, P., Dawes, C.J., 1991. *Friction Stir Butt Welding*. GB Patent No 9125978.8, International Patent Application No. PCT/GB92/02203

Tranggono, Aryo Cahyo.2011. *Analisis Pengaruh Pengelasan Aluminium 5083 Dengan Metode Gas Metal Arc Welding Terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro dan Ketahanan Korosinya*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Wijayanto, W. 2014. *Pengaruh Sudut Kemiringan Tool terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Sambungan Pelat AA5083 Pada Proses Friction Stir Welding*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret

Wiryosumarto, Harsono. 1996. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta:PradnyaParamita

(halaman sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Ivan Aji Kuntar, sering disapa Ivan / Aji / Kuntar, dilahirkan di Kabupaten Rembang, Jawa Tengah pada 13 Oktober 1994, merupakan putra dari pasangan Bapak Kuncahya Setya Wahana dan Ibu Puji Lestari. Penulis merupakan anak sulung dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SDN 4 Kutoharjo di tahun 2006, SMP Negeri 2 Rembang di tahun 2009 kemudian meneruskan ke SMA Negeri 1 Rembang. Setelah lulus dari SMA di tahun 2012, penulis diterima menjadi mahasiswa melalui jalur SNMPTN Undangan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam kegiatan akademik, penulis telah melaksanakan kerja praktek di PT Pertamina Refinery Unit 4, Cilacap dalam bagian Stationary Inspection Engineering. Di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi ini penulis mengambil Tugas Akhir dalam Bidang Studi Metalurgi Manufaktur.

Dalam perjalanan penulis selama menempuh pendidikan tinggi di Surabaya, banyak hal yang dapat dipelajari tidak hanya dari ilmu material dan metalurgi namun juga dari pengamatan dengan lingkungan sekitar, nuansa akademik dan praktikal yang berbeda namun saling terkait, serta bagaimana tiap individu untuk berperan dalam skenarionya masing-masing sebagaimana Tuhan Yang Maha Kuasa telah tetapkan bahkan sebelum manusia dilahirkan di dunia ini. Wallahu a'lam bish-shawabi

email : kuntar13@gmail.com