

**PENGARUH ARAH PUTARAN *TOOL* TERHADAP SIFAT MEKANIK
HASIL SAMBUNGAN ALUMINIUM *DOUBLE SIDE FRICTION STIR*
*WELDING***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



AKHMAD FANDI FAHRIZAL
NIM. 145060201111070

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH ARAH PUTARAN *TOOL* TERHADAP SIFAT MEKANIK
HASIL SAMBUNGAN ALUMINIUM *DOUBLE SIDE FRICTION STIR*
*WELDING***

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



AKHMAD FANDI FAHRIZAL

NIM. 145060201111070

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing pada
tanggal 18 November 2018

Dosen Pembimbing I

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., MT.
NIP. 19701017 199802 1 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1



Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelurusan berbagai karya ilmiah, gagasan, dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur penjiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (Undang-undang Nomor 20 Tahun 2003 Pasal 25 ayat (2) dan Pasal 70).

Malang, 20 Desember 2018

Mahasiswa,



Akhmad Fandi Fahrizal

NIM. 145060201111070

TURNITIN

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA**



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 175/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

AKHMAD FANDI FAHRIZAL

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH ARAH PUTARAN TOOL TERHADAP SIFAT MEKANIK HASIL
SAMBUNGAN ALUMINIUM DOUBLE SIDE FRICTION STIR WELDING**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **19 DEC 2018**



Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT
NIP. 19740930 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

PENGARUH ARAH PUTARAN *TOOL* TERHADAP SIFAT MEKANIK HASIL SAMBUNGAN ALUMINIUM *DOUBLE SIDE FRICTION STIR WELDING*

Nama Mahasiswa : Akhmad Fandi Fahrizal

NIM : 145060201111070

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik Manufaktur

KOMISI PEMBIMBING :

Dosen Pembimbing I : Ir. Djarot B. Darmadi, MT.,Ph.D.

Dosen Pembimbing II : Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI :

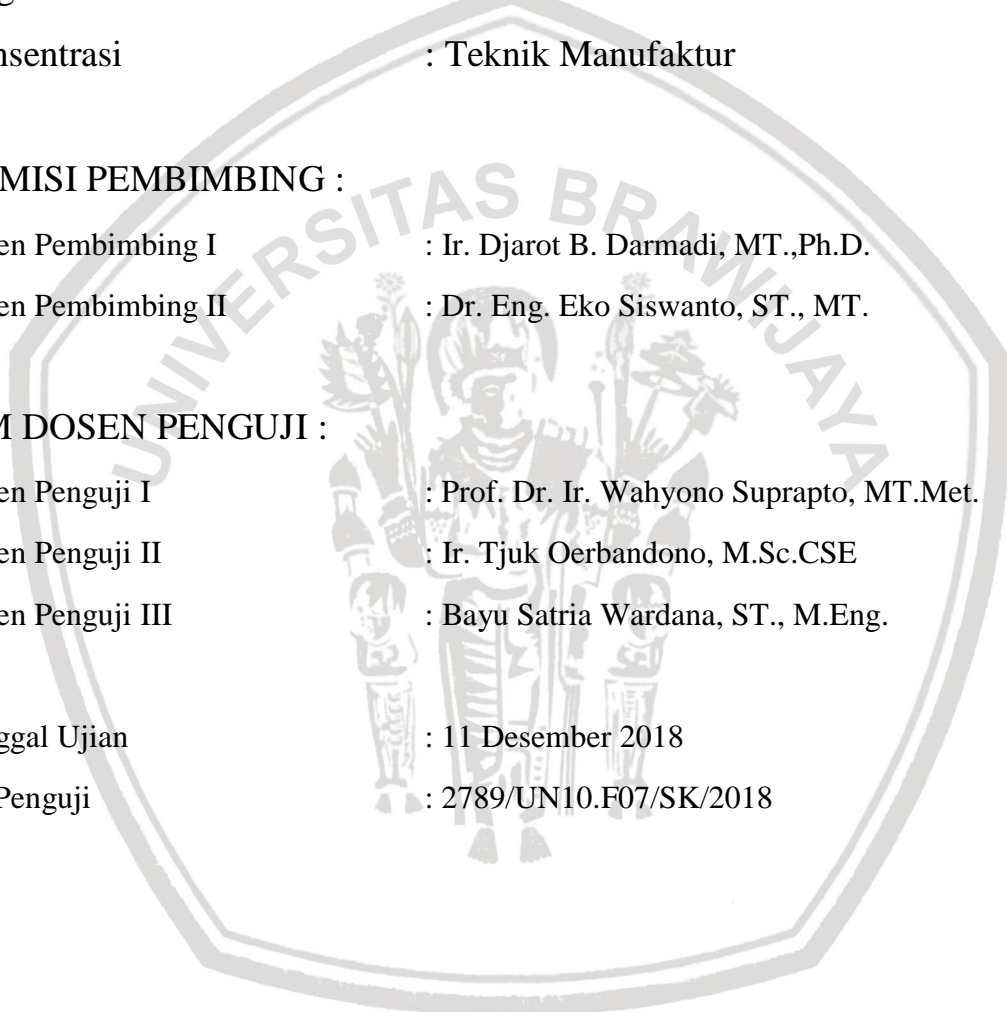
Dosen Penguji I : Prof. Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met.

Dosen Penguji II : Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc.CSE

Dosen Penguji III : Bayu Satria Wardana, ST., M.Eng.

Tanggal Ujian : 11 Desember 2018

SK Penguji : 2789/UN10.F07/SK/2018





*Skripsi Ini Saya Dedikasikan kepada :
Alm. Abah dan Mama tercinta*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, nikmat, dan karunia-Nya yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul, “**Pengaruh Arah Putaran Tool Terhadap Sifat Mekanik Hasil Sambungan Aluminium Double Side Friction Stir Welding**” dengan baik. Sholawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Besar Muhammad SAW.

Dalam kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu, membimbing, memberi petunjuk, dan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini :

1. Ir. Djarot B. Darmadi, MT.,Ph.D. selaku Ketua Jurusan dan Teguh Dwi Widodo, ST.,M.Eng.,Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah membantu kelancaran proses administrasi.
2. Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah membantu kelancaran administrasi.
3. Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc., CSE., selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Produksi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
4. Ir. Djarot B. Darmadi, MT.,Ph.D selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk berdiskusi dan telah memberikan banyak saran, masukan, dan motivasi dalam penyusunan skripsi.
5. Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., M.T. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan saran dan masukan sehingga penulis bisa menyelesaikan skripsi dengan sebaik- baiknya.
6. Alm. Dr. Eng. Sofyan Arief Setyabudi, ST., M.Eng dan Ir. Hastono Wijaya, M.T selaku dosen pembimbing akademis yang telah memberikan bimbingan, saran dan masukan serta motivasi selama saya menuntut ilmu di Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
7. Seluruh Dosen Pengajar, Staf Administrasi, dan Karyawan Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuannya untuk mendukung penyusunan skripsi ini.

8. Kedua orang tua tercinta, Alm H. Roikhan dan Lilik Agustin , serta seluruh anggota keluarga yang senantiasa memberikan do'a, nasihat, inspirasi, dan dukungan yang telah diberikan.
9. *Partner in crime* skripsi Annisa Mentary dan terimakasih untuk segala bantuan dan kemudahan yang telah diberikan selama proses penelitian.
10. Keluarga Besar Asisten Laboratorium Proses Manufaktur I, Bapak Dr.Eng.Eko Siswanto, ST., M.T. selaku kepala laboratorium, Bapak Kasmanu , ST. dan seluruh rekan asisten: Komeng, Jipau, Septian, Ade, Lucky, Ambon, Arief, Syahrizal dan Rafi.
11. Teman-teman seperjuangan mesin angkatan 14 terimakasih atas solidaritas, kebersamaan, dan beban pikiran yang penuh kenangan.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu dan mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan demi penyusunan skripsi dengan baik.

Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat berguna bagi kita semua sehingga dapat menjadi acuan untuk penelitian lebih lanjut untuk kemajuan kita bersama.

Malang, Desember 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	x
SUMMARY	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Pengelasan	5
2.3 <i>Friction Stir Welding</i>	7
2.3.1 <i>Double Sided Friction Stir Welding</i>	8
2.4 Sambungan Tumpul dan Sambungan Tumpul Ganda	10
2.5 Gaya pada <i>Friction Stir Welding</i>	11

2.6 Parameter Pengelasan <i>Friction Stir Welding</i>	12
2.7 Makrostruktur Daerah Hasil Pengelasan.....	13
2.8 <i>Advancing Side</i> dan <i>Retreating Side</i>	14
2.9 <i>Strain Hardening</i>	14
2.9.1 <i>Strain Hardening Behavior</i>	15
2.9.2 <i>Grain size strengthening</i>	15
2.10 Pengujian Kekerasan	16
2.10.1 Pengujian Kekerasan Metode Indentasi	17
2.11 Pengujian Tarik	19
2.12 Perancangan <i>Tool</i>	23
2.13 Aluminium	24
2.14 Hipotesis	26
BAB III METODE PENELITIAN	27
3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	27
3.2 Variabel Penelitian	27
3.2.1 Variabel Bebas	27
3.2.2 Variabel Terikat	28
3.2.2 Variabel Terkontrol	29
3.3 Spesifikasi Alat dan Bahan.....	29
3.3.1 Alat	29
3.3.2 Bahan	32
3.4 Prosedur Penelitian	32
3.4.1 Instalasi Penelitian	32

3.4.2	Prosedur Pra-Penelitian	33
3.4.3	Prosedur Proses Pengelasan	33
3.4.4	Prosedur Makrostruktur Hasil Sambungan	33
3.4.5	Prosedur Pengujian Kekuatan Tarik	34
3.4.6	Prosedur Pengujian <i>Microhardness</i>	35
3.5	Rancangan Penelitian.....	35
3.5.1	Analisis Data.....	35
3.5.2	Analisis Grafik	35
3.5.3	Analisis Gambar	36
3.6	Diagram Alir	37

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Penelitian	39
4.2	Analisa dan Pembahasan.....	39
4.2.1	Pengaruh Arah Putaran terhadap Kekuatan Tarik	39
4.2.2	Pengaruh Arah Putaran terhadap Distribusi Kekerasan	40
4.2.3	Analisis Foto Hasil Patahan Pengujian Kekuatan Tarik.....	44
4.2.4	Analisis Foto Hasil Patahan Pengujian Kekuatan Tarik.....	46
4.2.5	Analisis Makrostruktur Hasil Sambungan.....	48
4.2.6	Analisis Mikrostruktur Hasil Sambungan	51

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan.....	53
5.1	Saran	53

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Sifat Fisik dan Mekanik Aluminium	26



DAFTAR GAMBAR

No. Gambar	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Klasifikasi Cara Pengelasan	7
Gambar 2.2	Skema <i>Friction Stir Welding</i>	8
Gambar 2.3	Metode <i>Double-Side Friction Stir Welding</i>	9
Gambar 2.4	Jenis-jenis Sambungan Dasar	10
Gambar 2.5	<i>Butt joint</i> (a) dan <i>Double Butt Joint</i> (b)	11
Gambar 2.6	Gaya-gaya pada <i>Friction Stir Welding</i>	12
Gambar 2.7	Pembagian Daerah Pengelasan pada FSW	13
Gambar 2.8	Fenomena <i>strain hardening</i> pada diagram tegangan – regangan	15
Gambar 2.9	Ilustrasi Mekanisme <i>Grain Boundary</i> dan Slip	16
Gambar 2.10	Tabel Skala Kekerasan <i>Rockwell</i>	18
Gambar 2.11	Hubungan Tegangan dengan Regangan	20
Gambar 2.12	Karakteristik Patahan	22
Gambar 2.13	Konfigurasi <i>Shoulder</i> dan Pin	24
Gambar 3.1	Skema Variabel Bebas	28
Gambar 3.2	(a) Ilustrasi <i>advancing side</i> <i>retreating side</i> ; (b) Ilustrasi Pada hasil Pengelasan	28
Gambar 3.3	Mesin <i>Milling Universal</i>	29
Gambar 3.4	Mesin Uji Tarik	30
Gambar 3.5	Alat Uji Kekerasan <i>Micro Vickers</i> Eseway EW-412AAT	31
Gambar 3.6	<i>Tool FSW</i> dengan pin <i>flat-end cylindrical</i>	31
Gambar 3.7	Desain Benda Kerja Setelah Dilakukan Pengelasan	32
Gambar 3.8	Skema Instalasi Penelitian	32

Gambar 3.9 Dimensi Spesimen Pengujian Tarik.....	34
Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian.....	37
Gambar 4.1 Grafik Hubungan Arah Putaran <i>Tool</i> Terhadap Kekuatan Tarik.....	39
Gambar 4.2 Visualisasi <i>Advancing side</i> dan <i>Retreating side</i> pada putaran <i>tool</i> yang berbeda arah.....	40
Gambar 4.3 Visualisasi <i>Advancing side</i> dan <i>Retreating side</i> pada putaran <i>tool</i> yang searah.....	40
Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Arah Putaran Terhadap Distribusi Kekerasan (a) pin 6,5 mm; (b) pin 5,5 mm; (c) pin 4,5 mm; .	40
Gambar 4.5 Titik Pengambilan data Kekerasan pada Spesimen.....	41
Gambar 4.6 Aliran Material pada saat Proses Pengelasan	42
Gambar 4.7 Grafik Distribusi Kekerasan (a) sisi sebelah kiri garis pengelasan (b) sisi sebelah kanan garis pengelasan.....	43
Gambar 4.8 Penampang Hasil Patahan Spesimen Pengujian Tarik dengan Variasi Panjang Pin (a) 6,5 mm (b)5,5 mm (c) 4,5 mm (d) 3,5 mm (e) 2,5 mm Searah Putaran <i>Tool</i>	44
Gambar 4.9 Penampang Hasil Patahan Spesimen Pengujian Tarik dengan Variasi Panjang Pin (a) 6,5 mm (b)5,5 mm (c) 4,5 mm (d) 3,5 mm (e) 2,5 mm Beda Arah Putaran <i>Tool</i>	45
Gambar 4.10 Tampak Samping Patahan Spesimen Pengujian Tarik dengan Variasi Panjang Pin (a) 6,5 mm (b)5,5 mm (c) 4,5 mm (d) 3,5 mm (e) 2,5 mm Searah Putaran <i>Tool</i>	46
Gambar 4.11 Tampak Samping Patahan Spesimen Pengujian Tarik dengan Variasi Panjang Pin (a) 6,5 mm (b)5,5 mm (c) 4,5 mm (d) 3,5 mm (e) 2,5 mm Beda Arah Putaran <i>Tool</i>	47
Gambar 4.12 Makrostruktur Hasil Sambungan Las Pada Variasi Panjang Pin 3,5 mm Beda Arah Putaran <i>Tool</i>	48
Gambar 4.13 Makrostruktur Hasil Sambungan Las Pada Variasi Panjang Pin 3,5 mm Searah Putaran <i>Tool</i>	49

Gambar 4.14 Ilustrasi Pengambilan Foto Makrostruktur Hasil Sambungan Las 50

Gambar 4.15 Ilustrasi Pengambilan Foto Makrostruktur Hasil Sambungan Las 51

Gambar 4.15 Mikrostruktur Hasil Sambungan Las Variasi Panjang Pin *Tool* 4,5 mm Pada
(a) *interference zone* (b) *weld nugget* atas (c) *weld nugget* bawah dan (d) *Base Metal* 52



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Lembar Hasil Pengujian Kekuatan Tarik
Lampiran 2	Foto Hasil Patahan Spesimen Pengujian Kekuatan Tarik
Lampiran 3	Lembar Hasil Pengujian Kekerasan
Lampiran 4	Lembar Hasil Uji Komposisi



RINGKASAN

Akhmad Fandi Fahrizal, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Oktober 2018, Pengaruh Arah Putaran *Tool* Terhadap Sifat Mekanik Hasil Sambungan Aluminium *Double Side Friction Stir Welding*, Dosen Pembimbing : Djarot B. Darmadi dan Eko Siswanto.

Friction Stir Welding pertama kali dikenalkan oleh *The Welding Institute* (TWI) pada tahun 1991 di Inggris. *Friction Stir Welding* merupakan metode pengelasan tanpa melelehkan material (*solid-state welding*) yang menggunakan *tool non-consumable* yang berputar sesuai kecepatan *spindle* dan bergerak melintasi garis pengelasan sesuai dengan *feedrate* sehingga terjadi penempaan pada pusat lasan. *Friction stir welding* (FSW) mulai banyak dikembangkan karena dapat menyambungkan material yang kemampuan lasnya rendah (*welding ability*) seperti aluminium yang memiliki *strength weight of ratio* lebih bagus dari baja tetapi *welding ability* rendah dikarenakan kemampuan menghantarkan panas yang baik sehingga panas yang timbul pada proses pengelasan kurang terfokus pada daerah pengelasan. Seiring dengan berkembangnya waktu, FSW berinovasi menjadi *Double Side Friction Stir Welding* yang digunakan untuk material tebal yang tidak memungkinkan *tool* untuk melakukan penetrasi kedalam material dan menurunkan resiko kegagalan pada *tool* itu sendiri. DFSW bisa diterapkan dengan menggunakan mesin *Double Tool Friction Stir Welding* untuk pengelasan sisi ganda simultan, dan juga bisa pada mesin *Milling* untuk pengelasan sisi ganda non-simultan. Pada penelitian ini menggunakan sambungan *butt joint* dengan material aluminium dan parameter permesinan dengan kecepatan *spindle* 1452 rpm dengan *feedrate* 42 mm/min yang divariasikan dengan arah putaran *tool* (*clockwise – clockwise*) dan (*clockwise – counter clockwise*) yang dikombinasikan dengan panjang *tool* 2.5 mm, 3.5 mm, 4.5 mm, 5.5 mm dan 6.5 mm. Dari penelitian didapatkan kekuatan tarik hasil sambungan tertinggi didapat dengan menggunakan variasi beda arah putaran *tool* dengan panjang *tool* 6.5 mm dengan kekuatan tarik rata – rata sebesar 57.17 MPa. Dan untuk nilai distribusi kekerasannya tertinggi berada pada daerah *advancing side* dengan panjang *tool* 6,5 mm dengan arah putaran *tool* yang berbeda yaitu 90.3 *Vicker's microhardness* .

Kata kunci: *Friction Stir Welding, Double Side Friction Stir Welding, Arah Putaran Tool, Sifat Mekanik.*

SUMMARY

Akhmad Fandi Fahrizal, Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, Oktober 2018, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2018, Tool Round Direction Effects on Mechanical Properties of Welded Joint Aluminium Double Side Friction Stir Welding, Academic Supervisor: Djarot B. Darmadi and Eko Siswanto.

Friction Stir Welding (FSW) first introduced by TWI in 1991 in England. FSW is the welding method without melting the material (solid state welding) who used the non-consumable tool which rotates according to the spindle speed and move across the welding line matching with the federate so that forging occurs at the welding center

FSW began to be much developed because it can connect the material who has a poor welding ability such as aluminium which has the strength weight of rasio better than steel however the welding ability is poor because of the ability to deliver the heat was good so the arising heat in the welding process is less focused in the welding area. Along with the development of time, FSW innovates to Double Side Friction Stir Welding who used for thick material that does not allow tool of penetrate into the material and decrease the risk of failure of the tool itself. DFSW can be applied using Double Tool Friction Stir Welding Machine to Simultaneous double-side welding and also on milling universal for non-simultaneous double-sided welding in this research using a butt joint with aluminium material and machining parameters with spindle speed 1452 rpm with federate 42mm/min which is varied with the direction of the tool rotation (clockwise-clockwise) and (clockwise-counter clockwise) which combined with length of tool 2.5mm, 3.5mm, 4.5mm, 5.5mm and 6.5mm with an average tensile strength 57.17 Mpa and for value of the hardness distribution the highest value in the advancing side area with the tool length 6.5mm by using clockwise-counter clockwise is 90.3 vicker's microhardness.

Keywords: *Friction Stir Welding, Double Side Friction Stir Welding, Tool Round Direction, Mechanical Properties.*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini proses manufaktur berkembang sangat pesat dan semakin modern. Industri manufaktur semakin berkembang seiring dengan perubahan zaman yang menuntut aplikasi proses yang lebih sederhana tapi bisa menghasilkan produk yang maksimal dan sesuai dengan kebutuhan. Proses manufaktur merupakan proses pengolahan bahan mentah menjadi bahan yang siap pakai dan memiliki nilai jual. Adapun pada proses ini meliputi perencanaan produk, pemilihan bahan / material, pengolahan material, proses produksi, kontrol kualitas, dan pemasaran. Macam – macam proses manufaktur yang sering diaplikasikan antara lain proses permesinan, pembentukan, pengecoran dan penyambungan. Masing – masing dari proses manufaktur tersebut mempunyai kekurangan dan kelebihan dalam pengaplikasiannya. Sehingga dalam pemilihan proses dalam pengolahan material harus dipilih dengan tepat.

Pada beberapa dasawarsa ini penggunaan aluminium tidak terbatas pada industri otomotif, peralatan rumah tangga, konstruksi bangunan, juga digunakan dalam industri perminyakan seperti pipa dan tangki bahan bakar. Hal ini didasari karena aluminium dan paduannya termasuk logam ringan yang memiliki kekuatan tinggi, tahan karat, konduktor listrik yang cukup baik dan aluminium lebih ringan daripada besi atau baja. Namun sifat mampu las aluminium dinilai kurang baik karena mempunyai titik lebur yang rendah sehingga sangat sulit untuk memanaskan atau mencairkan sebagian dari material tersebut. Oleh karena itu pada perkembangannya, pengelasan dengan *friction stir welding* sangat baik dan sesuai untuk diaplikasikan pada logam aluminium karena pada prosesnya terjadi dibawah titik leburnya.

Pengelasan adalah proses penyambungan antara dua bagian logam atau lebih dengan memanfaatkan energi panas. Pengelasan menurut *Welding Science and Technology* adalah proses menggabungkan dua material melalui penggabungan lokal akibat kombinasi yang tepat antara temperatur, tekanan dan kondisi metalurgi. Dengan mengamati kondisi metalurgi, pengelasan dapat dilakukan dengan temperatur tinggi tanpa tekanan sampai tekanan tinggi dengan temperatur yang rendah (Ali Semari,2012,p.1) Pengelasan secara umum dibagi menjadi dua jenis, yaitu *fusion welding* dan *solid state welding* (Givi, 2014),

fusion welding merupakan proses penyambungan dengan melakukan peleburan logam isian (*filler*) yang disambungkan ke logam induk tanpa meleburkan logam induk itu sendiri sedangkan *solid-state welding* yang merupakan proses penyambungan logam yang menghasilkan ikatan metalurgi tanpa terjadi pencairan khususnya di material induk.

Pengelasan merupakan suatu proses penting yang tidak dapat dipisahkan dalam kegiatan peningkatan dan pengembangan dalam dunia industri, karena pengelasan dianggap sebagai metode penyambungan antara dua buah logam atau lebih yang paling sederhana dan tidak memerlukan banyak proses, yang mana hanya memberikan panas dan tekanan pada material tersebut sehingga dapat menyatu dan bersolidifikasi sehingga biaya yang diperlukan relatif lebih murah dan dapat dipergunakan secara lebih luas. Beberapa kendala ditemukan proses pengelasan, diantaranya adalah kebutuhan bahan pengisi pada proses pengelasan. Untuk itu dengan tujuan penghematan dalam proses pengelasan metode FSW dikembangkan karena pada proses ini pengelasan dilakukan tanpa menggunakan logam pengisi.

Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) pertama kali dikenalkan oleh *The Welding Institute* (TWI) pada tahun 1991 di Inggris. *Friction Stir Welding* merupakan salah proses pengelasan *solid-state* yang mengingatkan kita dengan fase *intermetallic* dari material paduan yang tidak lazim dipakai dalam proses penyambungan. metode ini dapat menghasilkan daerah *TMAZ* yang lebih kecil daripada pengelasan menggunakan busur nyala (Saviro,2015). Metode ini sangat dimungkinkan untuk menyambungkan material seperti aluminium paduan, copper, magnesium dan material dengan *low melting point* lainnya (Chao, Qi dan Tang, 2003,p.138).

Awalnya FSW dilakukan dengan dua cara, yaitu sambungan temu dan sambungan tumpang tindih. Dengan berkembangnya FSW dapat dilakukan dengan beberapa variasi sambungan, di antaranya adalah sambungan temu dengan ketebalan berbeda, sambungan tegak lurus, sambungan sudut, sambungan pengisian tumpang tindih, dan sambungan temu ganda. Ada beberapa parameter pada proses penyambungan dengan metode ini yaitu: kecepatan putar, kecepatan tempuh, bentuk *shoulder*, pin, gaya normal, kemiringan *tool*, kedalaman *shoulder* dan lain-lain.

Proses pengelasan dengan metode FSW atau pengelasan satu sisi masih memiliki kekurangan antara lain efek distorsi pada sambungan dan efisiensi sambungannya yang rendah akibat proses pengelasan yang kurang menyeluruh (*deep through*). Namun hal ini bisa diatasi oleh perkembangan terbaru dari FSW yaitu *Double-sided Friction Stir Welding* (DFSW) atau pengelasan aduk gesek sisi ganda. Menurut penelitian yang telah dilakukan

Mehra et al (2012) tentang kekuatan tarik FSW dan DFSW, dimana kekuatan tarik spesimen dan distribusi kekerasan hasil sambungan pada DFSW lebih tinggi dari FSW.

McPherson et al. (2012) melakukan studi komparatif sifat mekanik FSW dan DFSW pada pelat baja DH36 8 mm. Penggunaan pin atau *probe tool* yang lebih panjang dari setengah tebal pelat pada metode DFSW menghasilkan daerah yang mengalami dua kali pengelasan diantara *weld zone* yang disebut daerah *overlap* atau *interference zone*. Daerah ini diindikasikan meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan hasil sambungan yang dibuktikan dengan struktur butiran yang lebih kecil daripada struktur di *weld zone* dan logam induk

Terdapat daerah – daerah pada potongan melintang hasil pengelasan FSW dan DFSW seperti *Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)*, *Heat Affected Zone (HAZ)* dan *weld nugget* yang banyak dipengaruhi oleh geometri dan kecepatan *tool*. Daerah *advancing side* dan *retreating side* adalah istilah daerah hasil pengelasan pada permukaan benda kerja, daerah ini ditentukan oleh arah putaran *tool*. (Mishra et al., 2007)

Dudzik (2014) dalam penelitiannya mengenai karakteristik dari *advancing side* pada hasil sambungan FSW menyatakan bahwa nilai distribusi kekerasan pada hasil sambungan tertinggi di daerah *advancing side* dan patahan pada pengujian tarik tidak terjadi di daerah *advancing side* sehingga dapat disimpulkan kekuatan sambungan di daerah *advancing side* lebih tinggi dibandingkan dengan daerah *retreating side*. Hal ini didukung oleh penelitian Raja & Vashista (2016) yang dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa panas yang diperoleh di daerah *retreating side* pada saat proses pengelasan jauh lebih tinggi dari daerah *advancing side* sehingga kekerasannya jauh lebih rendah. Guerra et al. (2001) dalam penelitiannya mengenai nilai distribusi kekerasan pada daerah *advancing side* juga menghasilkan kesimpulan *advancing side* memiliki nilai kekerasan tinggi yaitu 95 *Vicker's microhardness* dan di daerah *retreating side* memiliki nilai kekerasan rendah yaitu 35 *Vicker's microhardness*.

Berdasarkan uraian yang disampaikan diatas dapat disimpulkan perlunya dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai metode pengelasan menggunakan *Double Sided Friction Stir Welding* dalam penelitian ini akan dibahas mengenai pengaruh beda arah putaran *tool* yang akan mengubah posisi *advancing side* dan *retreating side* pada daerah hasil sambungan terhadap sifat mekanik hasil sambungan aluminium DFSW

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan hal hal yang dikemukakan pada sub bab latar belakang, permasalahan yang akan dibahas adalah bagaimana pengaruh beda arah putaran *tool Double Sided Friction Stir Welding* pada sifat mekanik hasil sambungan aluminium.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini perlu dilakukan dengan batasan – batasan sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada pengaruh variasi arah putaran *tool* terhadap sifat mekanik hasil sambungan DFSW yang terbatas pada pengujian kekuatan tarik dan distribusi kekerasan.
2. Panas, gaya dan energi yang timbul diasumsikan hanya disebabkan oleh parameter pengelasan
3. Material benda kerja sebelum pengelasan diasumsikan homogen dan tanpa cacat
4. Pengambilan data diasumsikan terkalibrasi dan dalam keadaan standar.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah mengetahui pengaruh dari arah putaran *tool Double Sided Friction Stir Welding* pada kekuatan tarik dan kekerasan hasil sambungan aluminium.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah :

1. Menyediakan alternatif penyambungan logam aluminium dengan teknik *double sided friction stir welding*.
2. Mengetahui parameter optimum pengelasan *friction stir welding* yang berpengaruh terhadap kekuatan tarik dan kekerasan pada aluminium
3. Dapat dijadikan sebagai motivasi bagi pembaca agar dapat melakukan penelitian lebih lanjut mengenai *double sided friction stir welding*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Rajakumar, dkk (2012) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa faktor yang mempengaruhi hasil pengelasan FSW adalah *welding tool*, kecepatan putar *tool*, kecepatan pengelasan dan kedalaman pembedahan (*depth plunge*). Dengan kata lain parameter proses pengelasan yang tepat dapat meningkatkan kekuatan sambungan dan meminimalisir terjadinya cacat.

Kumar (2012) meneliti dengan membandingkan pengelasan adukan gesek sisi tunggal (*single sided friction stir welding*) dengan pengelasan sisi ganda (*double sided friction stir welding*) pada Al 1100 H14 dan hasil pengelasan adukan gesek sisi ganda (*double sided friction stir welding*) arah yang sama lebih unggul dalam kekuatan bila dibandingkan dengan pengelasan adukan gesek sisi tunggal (*single sided friction stir welding*).

Dudzik (2014) dalam penelitiannya mengenai karakteristik *advancing side* hasil sambungan FSW pada AL 7020 menyatakan bahwa nilai distribusi kekerasan hasil sambungan tertinggi di daerah *advancing side* dan patahan pada pengujian tarik tidak terjadi di *advancing side* sehingga dapat disimpulkan kekuatan di *advancing side* lebih tinggi.

Raja & Vashista (2016) dalam penelitiannya tentang proses FSW pada aluminium, menyimpulkan bahwa panas yang diperoleh *retreating side* jauh lebih tinggi dan nilai kekerasannya jauh lebih rendah dari *advancing side*.

Guerra et al. (2001) dalam penelitiannya mengenai nilai kekerasan pada daerah *advancing side* pada sambungan FSW menghasilkan kesimpulan *advancing side* memiliki nilai kekerasan tinggi 95 *Vicker's microhardness* dan di daerah *retreating side* memiliki nilai kekerasan rendah 35 *Vicker's microhardness*.

2.2 Pengelasan

Berdasarkan pengertian dari *Deutche Industrie Normen* (DIN) las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan cair. Sedangkan menurut *Welding Science and Technology* pengelasan merupakan proses menggabungkan dua material lewat penggabungan lokal dari kombinasi yang tepat antara

temperatur, tekanan dan kondisi metalurgi. Dari temperatur dan tekanan, mulai dari pengelasan dengan temperatur tinggi tanpa tekanan sampai tekanan tinggi dengan temperatur yang rendah (*Welding Science and Technology, Introduction to Welding Technology:1*). Sedangkan, menurut *American Welding Society (AWS)*, proses pengelasan merupakan proses penyambungan material dengan menggunakan kampuh las, sedangkan kampuh las didefinisikan sebagai logam yang membeku dari logam yang sebelumnya berada dalam keadaan cair akibat pemanasan pada temperatur tertentu dengan atau tanpa penekanan, dengan atau tanpa menggunakan logam pengisi.

Pengelasan sendiri memiliki arti lain dimana suatu proses untuk menyambungkan dua buah logam atau lebih yang berguna untuk mempermudah dan mengurangi biaya produksi. Setelah energi listrik dapat digunakan dengan mudah, teknologi dalam pengelasan semakin maju dan berkembang dengan pesatnya sehingga menghasilkan suatu teknik penyambungan yang lebih mutakhir dan pada masa sekarang perkembangan teknologi dalam pengelasan telah mencapai lebih dari 40 jenis pengelasan.

Menurut Wiryosumarto (2000,p.7) klasifikasi pengelasan secara umum dibagi menjadi tiga, yaitu :

1. Pengelasan Cair

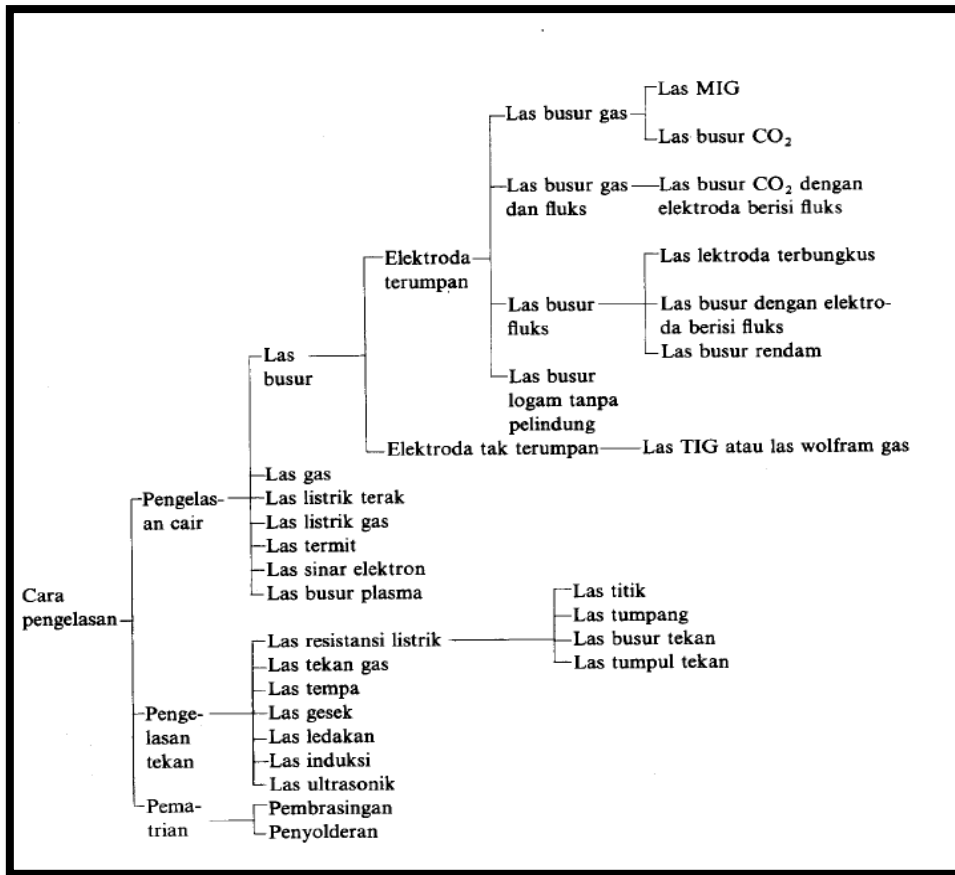
Pengelasan cair merupakan jenis pengelasan dimana pada daerah sambungan dipanaskan sampai mencair dengan menggunakan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar.

2. Pengelasan Tekan

Merupakan cara pengelasan dimana pada daerah sambungan dipanaskan dan kemudian pada sambungan yang telah panas tersebut ditekan hingga menjadi satu.

3. Pematrian

Pematrian adalah salah satu jenis pengelasan dimana pada daerah sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah, logam induk tidak ikut mencair.



Gambar 2.1 Klasifikasi Cara Pengelasan
 Sumber: Wiryosumarto (2000,p.8)

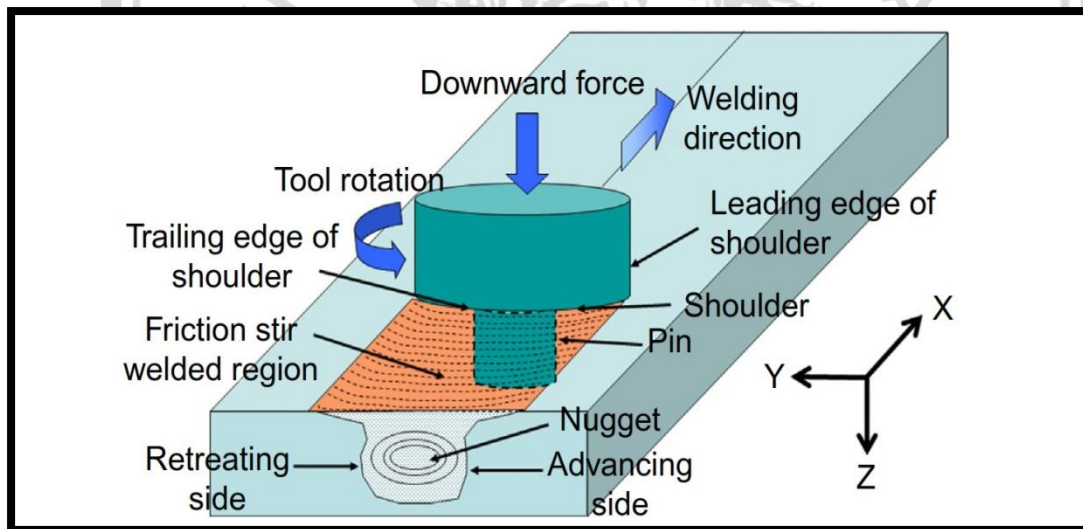
2.3 Friction Stir Welding

Friction stir welding merupakan salah satu teknik pengelasan yang baru diciptakan oleh Wayne Thomas di *The Welding Institut* (TWI) Cambridge Inggris pada tahun 1991. *Friction Stir Welding* merupakan sebuah proses pengelasan yang baru di promosikan, dengan sedikit biaya pada proses pengelasannya dan kualitas hasil sambungan yang baik. Hal tersebut terjadi karena dalam metode ini tidak diperlukannya *filler* / logam pengisi dan bisa memperkecil terjadinya cacat retak dan porositas pada hasil sambungan. Prinsip dari *Friction Stir Welding* menggunakan *tools* yang berputar sesuai kecepatan *spindle* dan bergerak melintas sesuai dengan *feedrate* sehingga terjadi penempaan pada pusat lasan menjadi lebur.

Proses pengelasan pada FSW bekerja di bawah suhu *melting* dari material benda kerja yaitu sekitar 80%-90% dari titik *melting*-nya (Chao, Qi dan Tang, 2003,p.138). Dikarenakan apabila terlalu tinggi temperature maka material induk terlalu cair sehingga akan terjadi *slip* dan kurang teraduk sesuai dengan ikatan mekanik (Lohwasser,2009). Pada proses *friction stir welding* (FSW), panas dihasilkan dari gesekan antara *tool* dan benda



kerja. Benda kerja akan menerima 95% dari panas total sedangkan *tool* akan menerima 5% dari panas total. Panas yang mengalir pada benda kerja akan menentukan kualitas hasil dari las-an, *residual stress* dan distorsi, Sedangkan panas yang mengalir pada *tool* akan berpengaruh pada keawetan *tool*. (Chao, Qi dan Tang, 2003,p.1) *Friction Stir Welding* yang ada pada Gambar 2.2 dapat dilihat bahwa terjadinya panas diperoleh dari gesekan antara *tool* dan spesimen yang *continue*, ini merupakan suatu prinsip dasar terciptanya proses pengelasan gesek. Pada proses *friction stir welding*, sebuah *tool* yang berputar digunakan untuk menekan material yang akan di satukan. Gesekan antara material yang akan disambung dengan *tool* yang berbentuk silindris (*cylindrical-shoulder*) yang dilengkapi *pin / probe* dengan material yang lebih keras dari logam induknya, mengakibatkan panas yang dihasilkan terfokus sehingga mampu melunakkan material yang akan dipadukan. *Tool* bergerak pada kecepatan yang konstan dan bergerak sepanjang jalur pengelasan (*joint line*) dari material yang akan di padukan dalam kondisi tercengkam rapat.

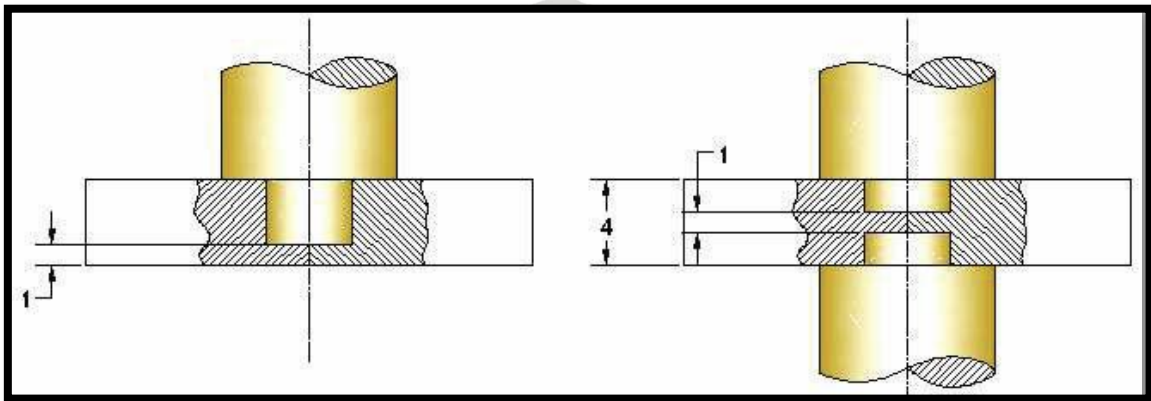


Gambar 2.2 Skema *Friction Stir Welding*
Sumber: Mishra dan Ma (2005)

2.3.1 Double-Sided Friction Stir Welding

Konsep metode ini adalah sepasang *tool* FSW yang disusun pada kedua sisi benda kerja pada satu titik sumbu dan bergerak simultan sepanjang lintasan. Metode ini terbukti menghasilkan sambungan yang lebih simetris serta distorsi yang lebih kecil, juga kekuatan tarik dan *ductility* yang lebih tinggi. Metode ini cocok digunakan pada pelat yang tebal yang tidak memungkinkan *tool* untuk melakukan penetrasi yang hampir menyeluruh ke

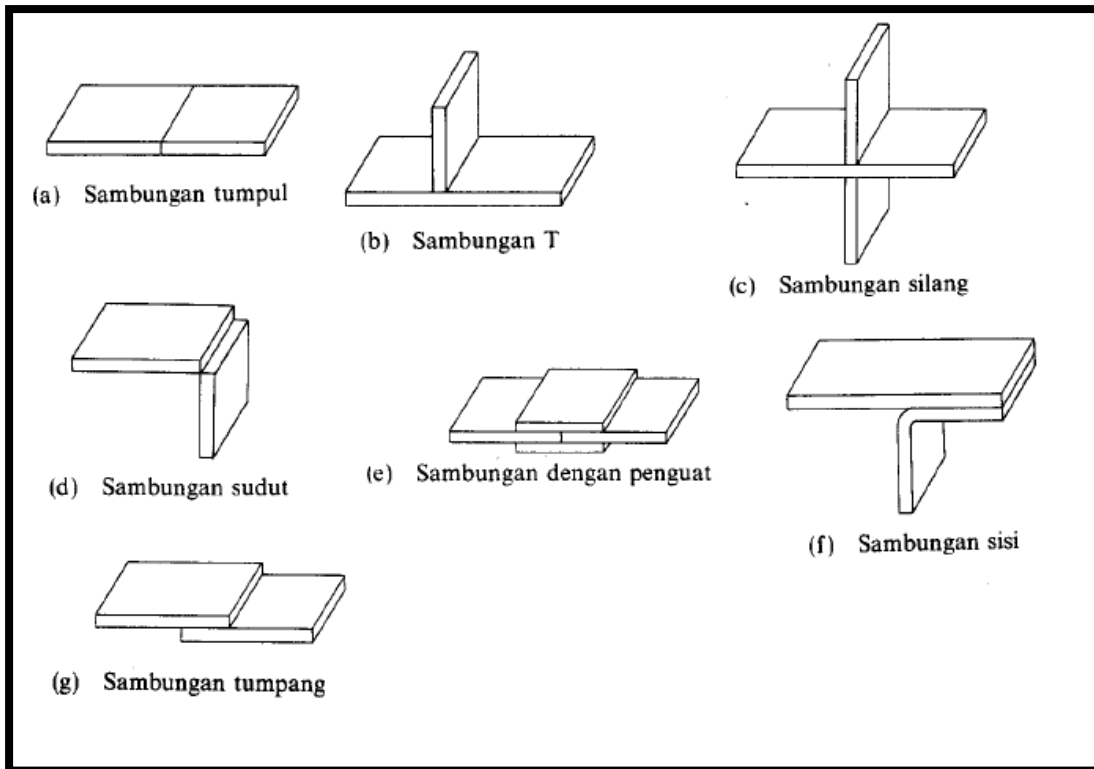
dalam pelat dan meningkatkan resiko kegagalan pada *tool* itu sendiri. Umumnya *probe/pin* dibuat tidak saling menyentuh namun diposisikan sangat dekat satu sama lain agar hasil adukan material saling tumpang-tindih untuk menghindari *kissing bond* (material yang permukaannya saling kontak namun tidak terjadi ikatan metalurgi). Metode DFSW dapat diterapkan menggunakan mesin *double-tool friction stir welding* untuk pengelasan sisi ganda simultan dan juga mesin *milling* untuk pengelasan sisi ganda non-simultan seperti penelitian yang akan saya lakukan.



Gambar 2.3 Metode *Double-Side Friction Stir Welding*
Sumber: Kumar (2012,p.5)

Parameter pengelasan yang digunakan merupakan parameter permesinan sehingga harus disesuaikan sedemikian rupa, sehingga pengurangan volume dari pin saat terjadi gesekan dengan material kerja dapat diperkecil. Hal ini bertujuan untuk menjaga *heat input* yang konstan sepanjang pengelasan atau *joint line*. Benda kerja harus dicengkam dengan kuat pada ragum untuk mempertahankan posisinya menolak gaya yang terjadi pada saat pengelasan agar mendapatkan hasil las yang optimum. (Mishra dan Ma 2015), menjelaskan bahwa terdapat beberapa keuntungan yang dapat diperoleh pada metode ini, antara lain:

1. Mampu mengelas logam yang berbeda.
2. Tidak terjadi pelelehan selama pengelasan.
3. *Tool* dapat digunakan terus - menerus.
4. Tidak memerlukan bahan pengisi / *filler*.
5. Tidak menimbulkan gas / polusi.



Gambar 2.4 Jenis-jenis sambungan dasar
Sumber: Wiryosumarto (2000,p.157)

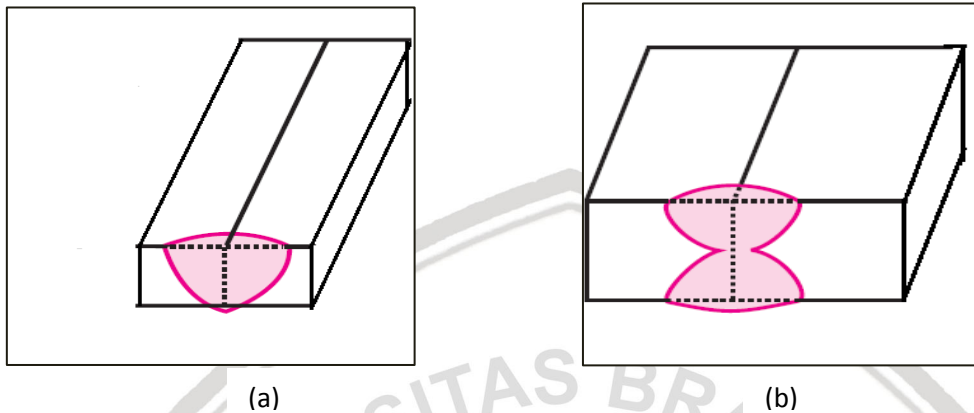
Pengelasan jenis ini pada umumnya dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan sambungan tumpul (*Butt joint*) dan sambungan tumpang tindih (*Lap joint*). Namun sejalan dengan pengembangannya, pengelasan jenis ini dilakukan dengan beberapa variasi antara lain : sambungan tumpul dengan ketebalan benda (*Dissimilar Thickness Butt*), sambungan tegak lurus (*Tee*), sambungan sudut (*Corner*), sambungan pengisian tumpang tindih 1 (*Lap Fillet*), dan sambungan tumpul ganda (*Double Sided Butt*).

2.4 Sambungan Tumpul dan Sambungan Tumpul Ganda

Menurut American Welding Society (AWS) sambungan *butt* adalah sambungan las diantara dua benda kerja yang disambung pada satu bidang yang sama. Sambungan *Butt* digunakan untuk konstruksi yang membutuhkan kekuatan yang tinggi. Sambungan jenis ini dapat menahan tekanan lebih baik dari sambungan las yang lain. Untuk mendapatkan efisiensi sambungan yang tinggi, pengelasan harus dilakukan dengan *deep-through* pada satu sisi, namun jika tidak memungkinkan dapat dilakukan pada kedua sisi benda kerja seperti *double joint*.

Jenis sambungan *double joint* bisa dihasilkan dengan pengelasan sisi ganda atau DFSW. Hasil sambungan ini mengurangi resiko *kissing bond*. Tidak ada perbedaan yang

signifikan mengenai penyusutan pada sambungan sisi tunggal dan sisi ganda pada *Friction Stir Welding* namun kekuatan sambungan dan *ductility* pada hasil sambungan sisi ganda lebih baik menurut penelitian McPherson (2012) akibat penetrasi *tool* yang lebih jauh ke dalam pelat dan menghasilkan ikatan metalurgi yang lebih baik.

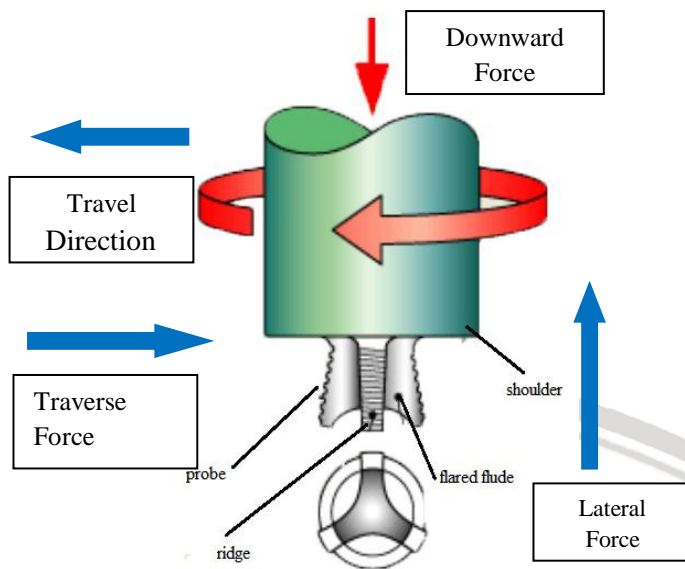


Gambar 2.5 Butt Joint (a) dan Double-Butt Joint (b)
Sumber: Minnick (2013,p.58)

2.5 Gaya pada *Friction Stir Welding*

Gaya yang terjadi pada *tool Friction Stir Welding* adalah:

1. *Downward force*, merupakan gaya utama yang bertujuan untuk mempertahankan posisi *tool* pada daerah aduk atau dibawah permukaan material benda kerja.
2. *Traverse force*, gaya yang sejajar dengan arah pergerakan *tool*. Peningkatan gaya transversal merupakan wujud resistansi material terhadap pergerakan *tool*, dan sejalannya proses gaya ini akan berkurang sejalan dan naiknya temperatur kerja.
3. *Lateral force*, adalah reaksi gaya dari *downward force* atau gaya yang tegak lurus dengan arah dari pergerakan *tool*.
4. *Torsi* dibutuhkan untuk memutar *tool*, besarnya nilai koefisien gesek atau *flow strength* dari material dan besarnya dari *downward force*.



Gambar 2.6 Gaya-gaya pada *Friction Stir Welding*
 Sumber: Suardi, (2011,p.9)

2.6 Parameter Pengelasan *Friction Stir Welding*

Parameter pengelasan dari FSW meliputi:

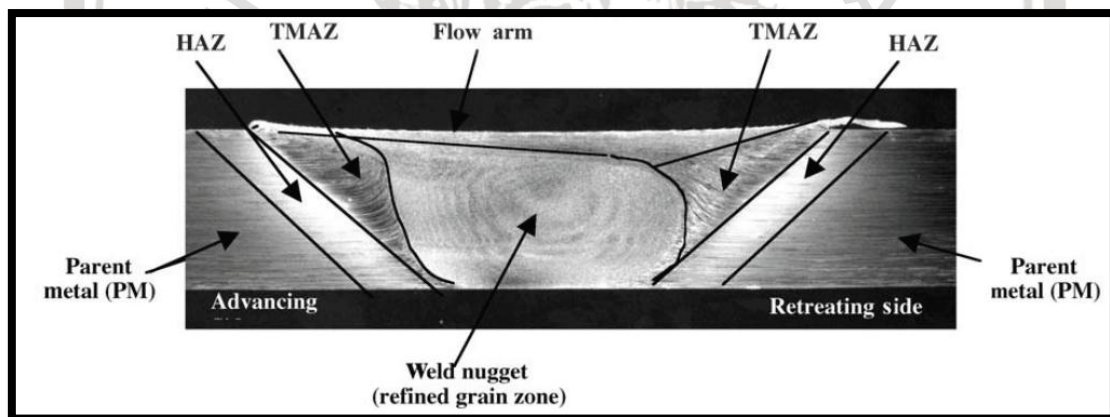
1. *Spindle Speed* (kecepatan putar), peningkatan dari kecepatan putar secara umum akan menurunkan kebutuhan tekanan pengelasan dan meningkatkan masukan panas. Penurunan tekanan pengelasan tidak akan meningkatkan putaran secara langsung
2. *Travel Speed* (kecepatan tempuh), peningkatan kecepatan pengelasan akan meningkatkan tekanan pengelasan.
3. Geometri *Tool* merupakan parameter yang perlu diperhatikan dalam pembuatan *tool* meliputi diameter *shoulder*, diameter pin, panjang pin serta bentuk pin.
4. *Travel angle* (sudut pengelasan), peningkatan sudut pengelasan akan memperbesar tekanan pengelasan.
5. *Plunge depth* (kedalaman tool), kedalaman tool atau panjang pin yang melakukan penetrasi terhadap material yang akan dilas.

Rotational speed (kecepatan putar) dan *travel speed* (kecepatan tempuh) harus ditentukan untuk memperoleh proses pengelasan yang efisien dengan hasil yang optimal. Hubungan antara kecepatan tempuh dan *heat input* selama proses pengelasan bisa dikatakan bahwa, bertambahnya *Rotational speed* atau menurunkan *travel speed* cenderung akan meningkatkan *heat input* dan temperature pengelasan (Terry, 2005,p.13). Jika pada material tidak cukup mendapatkan panas maka yang akan terjadi adalah hasil pengelasan

menjadi tidak optimal sehingga dimungkinkan terjadi cacat rongga atau cacat - cacat lain dan kemungkinan *tool* mengalami kerusakan. Namun apabila *heat input* yang terlalu tinggi dapat juga merugikan sifat akhir dikarenakan perubahan karakteristik / sifat logam induk material. Oleh sebab itu, saat menentukan parameter harus dilakukan secara matematis. Untuk itu *heat input* harus cukup tidak terlalu tinggi atau terlalu rendah untuk mencegah timbulnya sifat - sifat las yang merugikan.

Tekanan *shoulder* bertujuan untuk memberi efek *forging* pada benda kerja. Benda kerja pada kondisi panas di tekan dari atas oleh *shoulder* dan di tahan oleh landasan benda kerja dari bawah. Tujuan proses ini adalah memampatkan benda kerja yang akan disambung agar dapat tersambung karena adanya efek tempa tersebut. Selain itu pada tekanan *shoulder* juga menghasilkan *heat input* karena permukaannya yang lebih besar bergesekan dengan benda kerja.

2.7 Makrostruktur Daerah Hasil Pengelasan



Gambar 2.7 Pembagian Daerah Pengelasan pada FSW
Sumber: ASM International (2007)

Friction Stir Welding menghasilkan daerah-daerah pengelasan yang disebabkan oleh panas yang dihasilkan dari putaran tool dan gerakan translasi akan menciptakan perbedaan struktur pada sambungan las. Adapun perbedaan daerah pengelasan dibagi menjadi 4 area yaitu :

1. *Weld Nugget* adalah area yang melunak dan membentuk ikatan metalurgi pengelasan akibat gesekan dan adukan tool.
2. *Thermomechanically Affected Zone (TMAZ)* adalah area mengalami deformasi plastis akibat panas yang dihasilkan dari gesekan tool. Meskipun mengalami deformasi

plastis, pada area ini tidak mengalami rekristalisasi seperti halnya weld nugget. Biasanya ada batas jelas yang membedakan daerah TMAZ dan *weld nugget*.

3. *Heat Affected Zone* (HAZ), area ini merupakan area yang paling dekat dengan pusat dari lokasi pengelasan. Material pada area ini sudah mengalami siklus termal yang menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik dari base metal. Meskipun demikian, material pada area ini tidak mengalami deformasi plastis akibat panas pengelasan.
4. *Base Metal*, merupakan bagian utama dari material yang tidak terpengaruh apapun akibat panas yang dihasilkan pada proses pengelasan (ASM International, 2007).

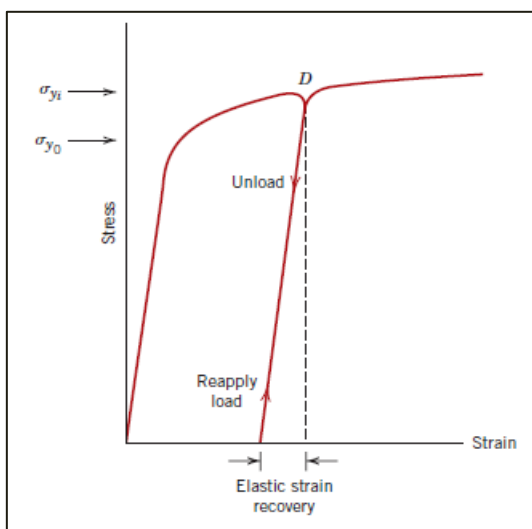
2.8 *Advancing Side dan Retreating Side*

Menurut Colligan yang dikutip oleh Terry (2005,p.9) *advancing side* merupakan daerah dimana arah gerakan material di permukaan searah dengan arah pengelasan dan *retreating side* sebaliknya. *Advancing side* dan *retreating side* juga disebut daerah geser dan daerah alir. Menurut Mishra (2007) gerakan *tool* akan mengeruk dan mendeformasi daerah *advancing side* secara intens dan material akan terdeformasi plastis lalu mengalir berlawanan arah pengelasan ke *retreating side*. Besarnya deformasi plastis di daerah *advancing side* yang dipengaruhi oleh tekanan dan gesekan akan meningkatkan temperatur material dan menyebabkan material dapat mengalir dan memadat di *advancing side*. Deformasi plastis yang besar pada *advancing side* berdampak pada terjadinya *wormhole* atau *void* utamanya pada kecepatan putaran rendah atau kecepatan pengelasan yang tinggi. Aliran material plastis temperatur tinggi di daerah *retreating side* menyebabkan kekerasan di daerah ini lebih rendah dibandingkan kekerasan di *advancing side*. Hal ini dibuktikan oleh penelitian Dudzik, Guetra, serta Raja & Vashista pada subbab 2.1 diatas. Pada pengujian tarik patahan tidak terjadi pada daerah *advancing side* dikarenakan kekuatannya yang lebih tinggi dibandingkan *retreating side*. Ilustrasi *advancing side* dan *retreating side* saat pengelasan dapat dilihat pada gambar 2.2 skema *friction stir welding*.

2.9 *Strain Hardening*

Strain hardening adalah metode untuk meningkatkan kekuatan dan kekerasan material dengan deformasi plastis pada temperatur relatif rendah terhadap $T_{melting}$ material. (Callister, 2007,p.191) *Strain hardening* dapat dijelaskan pada gambar 2.8 diagram tegangan – regangan, dimana material dideformasi sampai titik *yield* sehingga terdeformasi plastis. Beban yang dilepaskan lalu diberikan kembali tidak akan menambah deformasi

material karena terjadi resistansi sampai titik tertentu, namun pada titik *yield* yang baru material akan kembali terdeformasi. *Strain hardening* menurunkan *ductility* dari material.



Gambar 2.8 Fenomena *strain hardening* pada diagram tegangan – regangan
Sumber: Callister (2007,p.154)

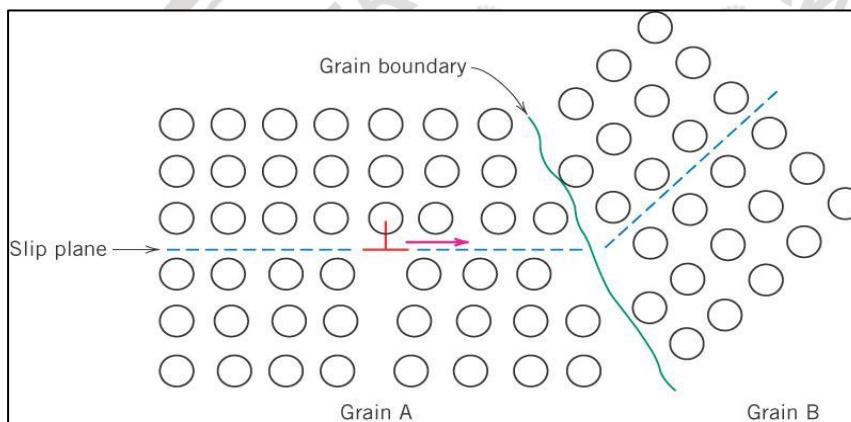
Strain hardening terjadi akibat deformasi plastis pada temperatur relatif rendah terhadap $T_{melting}$ absolut material, deformasi plastis ini menyebabkan dislokasi material berlipat ganda dan meningkatkan rasio jumlah dislokasi per luas area atau densitas dislokasi. Dislokasi yang padat dan bertumpuk menyebabkan dislokasi semakin sulit bergerak apabila diberikan gaya yang besarnya konstan, sehingga dibutuhkan gaya yang lebih besar untuk mendeformasi material.

2.9.1 Strain Hardening Behavior

Selain mikrostruktur dan sifat mekanik, *strain hardening behavior* pada sambungan FSW juga merupakan parameter penting terhadap kemampuan material dalam menerima beban. Penelitian TL. & CE. (1970) mengenai efek ukuran butiran terhadap *strain hardening behavior* pada polikristal menyebutkan *grain boundary strengthening* sangat dipengaruhi oleh densitas dislokasi dan ukuran butiran yang juga merupakan dampak *strain hardening* dan dapat diukur menggunakan persamaan *strain hardening behavior*. *Strain hardening behavior* merupakan perubahan sifat material setelah mengalami deformasi plastis yang ditandai dengan perubahan σ_{yield} dan kekerasan yang juga dipengaruhi oleh perubahan ukuran butiran seperti yang akan dibahas pada Subbab 2.7.2.

2.9.2 Grain size strengthening

Grain size strengthening ditandai dengan menurunnya ukuran butiran rata-rata (*average grain size*) suatu material. Menurunnya ukuran butiran diakibatkan tingginya energi yang tersimpan dalam butiran; rendahnya *heat input*; dan laju pendinginan yang relatif cepat. (Avner, 1974,p.137) Menurunnya ukuran butiran mempengaruhi kekuatan material. Semakin kecil ukuran butiran pada suatu dimensi benda kerja maka akan semakin banyak butiran yang terbentuk dan semakin banyak pula batas butir. Batas butir memiliki tegangan permukaan yang berguna untuk menahan *slip*. Batas butir yang jumlahnya meningkat menyebabkan energi yang dibutuhkan untuk *slip* agar dapat merambat lebih besar sehingga kekuatan material dengan butir kecil lebih tinggi. Menurunnya ukuran butir rata-rata meningkatkan kekuatan *yield* dan kekuatan patah material dan juga meningkatkan ketangguhan material. (Roylance, 2008,p.98)



Gambar 2.9 Ilustrasi Mekanisme *Grain Boundary* dan Slip
Sumber: Abbaschian (2009,p.478)

2.10 Pengujian Kekerasan

Kekerasan merupakan ukuran resistansi material terhadap deformasi plastik lokal. Pengujian kekerasan konvensional secara kualitatif dilakukan berdasarkan resistansi bahan terhadap goresan dan potongan menggunakan skala Mohr. Metode pengujian kekerasan kuantitatif terbagi atas pengujian kekerasan berdasarkan resistansi bahan terhadap indentasi, yang menggunakan indenter yang ditekan ke permukaan material uji dengan gaya statis yang dapat dikontrol. Kedalaman dan luas jejak indentasi diukur dan dikonversi menjadi nilai kekerasan sesuai standar pengujian masing-masing. Metode pengujian kekerasan kuantitatif lainnya adalah metode kekerasan elastis yang memanfaatkan gaya lenting benda jatuh bebas ke permukaan material uji, dimana gaya lenting tadi dijadikan

parameter proporsional terhadap kekerasan material uji. Untuk material seperti baja, kuningan, dan besi cor nilai kekuatan tarik dan kekerasannya proporsional. (Callister,2007,p.160)

2.10.1 Pengujian Kekerasan Metode Indentasi

Pengujian kekerasan metode indentasi menghasilkan data nilai kekerasan yang berbanding terbalik dengan kedalaman indentasinya atau proporsional terhadap besar gaya indentasi rata – ratanya. Jenis pengujian yang umum digunakan pada pengujian kekerasan metode indentasi adalah sebagai berikut.

1. *Brinell Hardness Test*, pengujian ini menggunakan alat *hydraulic press vertical* yang dioperasikan secara manual untuk menekan bola indenter ke dalam permukaan material uji. Prosedur standar menggunakan indenter berbentuk bola berdiameter 10 mm dengan gaya 3000 kg untuk logam ferro dan 500 kg untuk logam non-ferro. Pada logam ferro indentasi dilakukan minimal selama 10 detik dan 30 detik untuk logam non-ferro. *Brinell Hardness Number* (HB) dinyatakan dalam rasio beban dalam satuan massa terhadap luas jejak indentasi dalam satuan luas yang dihitung dengan persamaan 2-1 berikut.

$$HB = \frac{L}{\left(\frac{\pi D}{2}\right)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots (2-1)$$

dimana L adalah beban dalam satuan massa (kg), D adalah diameter bola indenter dan d adalah diameter jejak indentasi yang keduanya dalam satuan panjang (mm). Perhitungan ini jarang digunakan karena tabel konversi untuk pengujian Brinell telah disediakan. Pengujian kekerasan Brinell dengan indenter bola standar terbatas pada nilai maksimal 500 HB. Material uji dengan kekerasan melebihi batas tersebut akan menyebabkan bola indenter terdeformasi sehingga mengacaukan hasil pengujian. Dengan mengganti indenter bola standar yang terbuat dari baja yang dikeraskan dengan indenter bola dari tungsten karbida, batas maksimal kekerasan yang dapat diukur meningkat ke 650 HB.

2. *Rockwell Hardness Test*, pengujian ini menggunakan alat dengan dial yang menunjukkan langsung hasil pengukuran. Pengujian ini memiliki prinsip yang sama dengan pengujian Brinell, yaitu pengukuran laju perubahan kedalaman indenter. Pengujian dilakukan dengan meja beserta spesimen uji yang diangkat terhadap indenter hingga permukaan keduanya bersentuhan dan beban minor terjadi. Kemudian beban major diaplikasikan menggunakan

sistem tuas. Saat jarum dial menunjukkan angka nol, beban mayor dilepaskan namun beban minor masih bekerja dan *Rockwell Hardness Number* terbaca pada dial. Semakin dalam jejak indentasi maka semakin lunak material uji dan nilai kekerasan Rockwell akan semakin kecil. Alat pengujian kekerasan Rockwell terbagi atas *normal tester* untuk spesimen uji yang cukup tebal dengan beban minor 10 kg dan *superficial tester* untuk spesimen uji yang lebih tipis dengan beban minor 3 kg. Indentor yang digunakan pada pengujian Rockwell terdiri dari bola baja berdiameter $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$ dan intan kerucut 120° . Beban mayor sebesar 60, 100 dan 150 kg pada *normal tester* dan 15, 30 dan 45 kg pada *superficial tester*. Skala kekerasan Rockwell dan material uji spesifiknya diberikan pada gambar 2.8 berikut.

SCALE	MAJOR LOAD, KG	TYPE OF INDENTER	TYPICAL MATERIALS TESTED
A	60	Diamond cone	Extremely hard materials, tungsten carbides, etc.
B	100	$\frac{1}{16}$ " ball	Medium hard materials, low- and medium-carbon steels, brass, bronze, etc.
C	150	Diamond cone	Hardened steels, hardened and tempered alloys
D	100	Diamond cone	Case-hardened steel
E	100	$\frac{1}{8}$ " ball	Cast iron, aluminum and magnesium alloys
F	60	$\frac{1}{16}$ " ball	Annealed brass and copper
G	150	$\frac{1}{16}$ " ball	Beryllium copper, phosphor bronze, etc.
H	60	$\frac{1}{8}$ " ball	Aluminum sheet
K	150	$\frac{1}{8}$ " ball	Cast iron, aluminum alloys
L	60	$\frac{1}{4}$ " ball	Plastics and soft metals such as lead
M	100	$\frac{1}{4}$ " ball	Same as L scale
P	150	$\frac{1}{4}$ " ball	Same as L scale
R	60	$\frac{1}{2}$ " ball	Same as L scale
S	100	$\frac{1}{2}$ " ball	Same as L scale
V	150	$\frac{1}{2}$ " ball	Same as L scale

Gambar 2.10 Tabel Skala Kekerasan Rockwell
Sumber: Avner (1974,p.30)

3. *Vickers Hardness Test*, memiliki prinsip kerja yang sama dengan pengujian Brinell yaitu nilai kekerasannya dinyatakan dalam rasio beban terhadap luasan jejak indentasi. Rentang beban indentasi adalah 1 sampai 120 kg. Indentor yang digunakan adalah intan berbentuk limas segiempat dengan sudut 136° sehingga jejak indentasinya

berbentuk persegi dan pengukuran diagonal perseginya diukur menggunakan mikroskop dengan mikrometer okuler. Terdapat tabel konversi hasil pengukuran diagonal dan nilai kekerasan Vickers (HV) yang juga memenuhi persamaan 2-2 berikut.

$$HB = \frac{1,854L}{d^2} \dots\dots\dots (2-2)$$

dengan L adalah beban yang diaplikasikan dalam satuan massa (kg) dan d adalah diagonal jejak indentasi dalam satuan panjang (mm). Karena rentang bebannya yang besar, pengujian Vickers dapat digunakan untuk mengukur kekerasan pelat yang sangat tipis sampai benda berukuran besar dan berat.

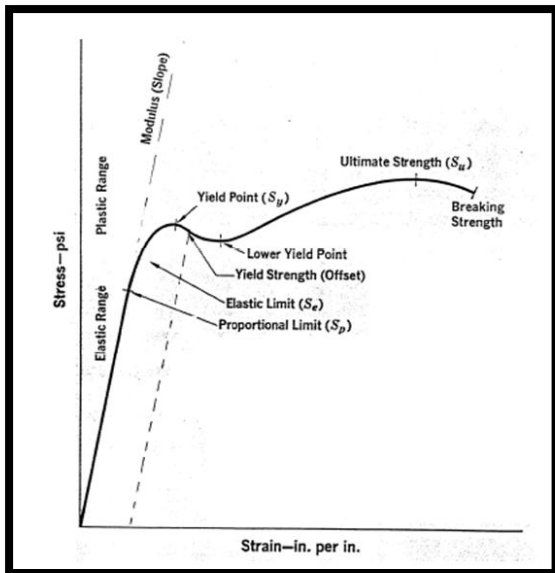
4. *Microhardness Test*, pengujian ini bukan digunakan untuk mengukur kekerasan yang nilainya sangat kecil (sangat lunak) namun indenter yang digunakan sangat kecil sehingga diaplikasikan untuk struktur mikro. Beban yang diaplikasikan berkisar antara 1 sampai dengan 1000 gram. Indenter yang digunakan untuk pengujian kekerasan mikro adalah indenter intan milik Vickers dan indenter Knoop yang bersudut 136° dan memanjang. Untuk mencari nilai kekerasan Knoop dapat menggunakan tabel ataupun persamaan 2-3

$$HK = \frac{14,229L}{d^2} \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan d adalah diagonal terpanjang jejak indentasi dalam satuan panjang (mm).

2.11 Pengujian Tarik

Pengujian Tarik merupakan salah satu jenis pengujian yang tergolong merusak benda kerja (*Destructive Test*) dimana pada pengujian ini diberikannya gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujung benda kerja yang fungsinya mengetahui kekuatan tarik suatu benda / material.



Gambar 2.11 Hubungan Tegangan dengan Regangan
Sumber : Amat (2009)

Kekuatan tarik atau kekuatan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength*) adalah kemampuan suatu material untuk menahan serta menerima gaya sejajar dengan sumbunya sebelum mengalami perubahan bentuk. Pada pengujian tarik, spesimen diberi beban yang arahnya berlawanan atau tarik secara *continue* dan pelan - pelan dengan nilai beban yang terus meningkat sampai dengan beban maksimum yang dapat diterima oleh material yang diuji lalu patah. Seperti yang diungkapkan M. Azwar Amat dari kurva dapat dilihat terdapat beberapa macam daerah yang tercipta saat uji tarik, diantaranya:

- Batas proporsional (*Proportionality limit*)

Merupakan daerah batas dimana tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) mempunyai hubungan proporsionalitas satu dengan yang lainnya. Setiap penambahan tegangan akan diikuti dengan penambahan regangan secara proporsional dalam hubungan linier $\sigma = E.\epsilon$.

- *Elastisitas dan Plastisitas Logam*

Bila logam dipengaruhi oleh suatu gaya, akan berubah bentuknya, yang berarti logam telah mengalami suatu deformasi. Bila gaya yang bekerja pada logam tersebut dihilangkan, ada logam yang kembali ke bentuk atau dimensi semula (*recoverable*), yang disebut dengan deformasi elastis. Ada juga logam yang tidak kembali ke bentuk atau dimensi semula (*irrecoverable*), dapat dikatakan logam telah mengalami deformasi plastis.

- Batas elastis (*Elastic limit*)

Daerah elastic adalah daerah dimana bahan akan kembali kepanjangan semula bila tegangan luar dihilangkan. Daerah proporsional merupakan daerah elastis ini. Selanjutnya

bila bahan terus diberi tegangan (deformasi dari luar) maka batas elastis akan terlampaui pada akhirnya sehingga bahan tidak akan kembali kepada ukuran semula. Dengan kata lain dapat didefinisikan bahwa batas elastic merupakan suatu titik dimana tegangan yang diberikan akan menyebabkan terjadinya deformasi permanen (plastis) pertama kalinya. Kebanyakan material teknik memiliki batas elastis yang hampir berimpitan dengan batas proporsionalitasnya.

- Titik luluh dan kekuatan luluh (*yield strength*)

Titik ini merupakan suatu batas dimana material akan terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban. Tegangan (*stress*) yang mengakibatkan bahan menunjukkan mekanisme luluh ini disebut tegangan luluh (*yield stress*). Dengan metode ini kekuatan luluh (*yield strength*) ditentukan sebagai tegangan dimana bahan memperlihatkan batas penyimpangan/deviasi tertentu dari proporsionalitas tegangan dan regangan.

Kekuatan luluh atau titik luluh merupakan sebuah gambaran kemampuan bahan menahan deformasi permanen bila digunakan dalam penggunaan structural yang melibatkan pembebanan mekanik seperti tarik, tekan bending atau puntiran. Dapat dikatakan bahwa titik luluh adalah suatu tingkat tegangan yang:

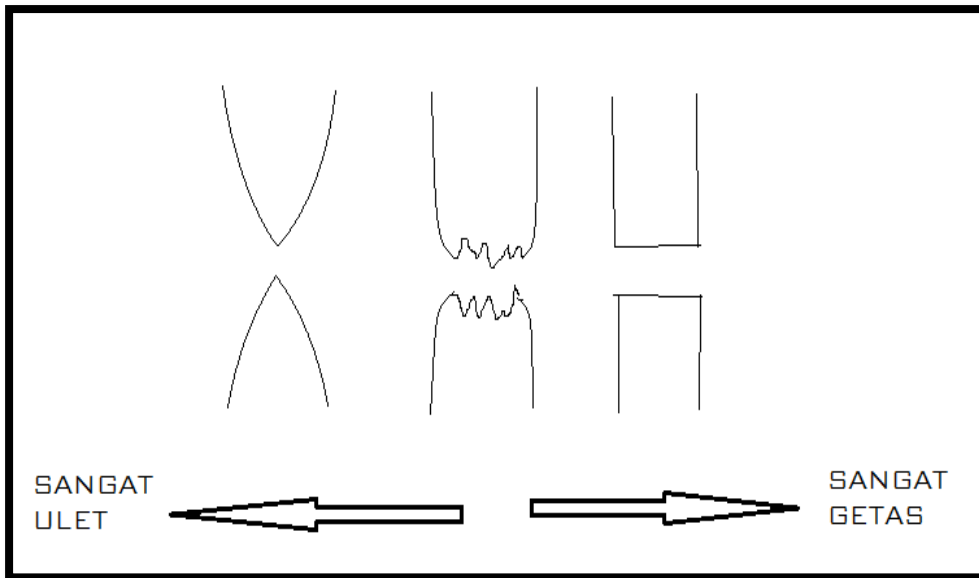
- 1) Tidak boleh dilewati dalam penggunaan structural (*inservice*)
- 2) Harus dilewati dalam proses manufaktur logam (*forming process*)

- Kekuatan Tarik Maksimum (*Ultimate Tensile Strength*)

Merupakan tegangan maksimum yang dapat diterima oleh material sebelum terjadinya perpatahan (*fracture*). Nilai kekuatan tarik maksimum (σ_{uts}) ditentukan dari beban maksimum (F_{maks}) dibagi luas penampang awal (A_o).

- Kekuatan Putus (*Breaking strength*)

Kekuatan putus ditentukan dengan membagi beban pada saat benda uji putus (F_{breaks}) dengan luas penampang awal. Pada bahan ulet kekuatan putusnya adalah lebih kecil dari pada kekuatan maksimumnya sementara pada bahan getas kekuatan putus adalah sama dengan kekuatan maksimumnya. Sedangkan untuk karakteristik patahan pada material dikatakan ulet bila material tersebut mengalami deformasi elastis dan plastis sebelum akhirnya putus. Sedangkan material getas tidak mengalami deformasi plastis sebelum mengalami putus. Hal ini juga bisa dilihat dari bentuk hasil patahan.



Gambar 2.12 Karakteristik Patahan
Sumber : Amat (2009)

1. Perpatahan Ulet (*ductile*)

Tahapan terjadinya perpatahan ulet pada sampel uji tarik :

- Penyempitan awal
- Pembentukan rongga-rongga kecil
- Penyatuan rongga-rongga menjadi suatu retakan
- Perambatan retakan
- Perpatahan gesek akhir pada sudut 45°

2. Perpatahan Getas (*brittle*)

Perpatahan getas memiliki ciri-ciri berikut :

- Tidak ada atau sedikit sekali deformasi plastis yang terjadi pada material.
- Retak/perpatahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin membelah atom-atom material (transgranular).
- Pada material lunak dengan butir kasar (coarse grain) maka dapat dilihat pola-pola yang dinamakan chevrons or fan-like pattern yang berkembang keluar dari daerah awal kegagalan.
- Material keras dengan butir halus (fine-grain) tidak memiliki pola-pola yang mudah dibedakan.
- Material amorphous (seperti gelas) memiliki permukaan patahan yang bercahaya dan mulus. (Amat,2009)

Pengujian tarik pada daerah pengelasan dimaksudkan untuk mengetahui apakah kekuatan las pada daerah las mempunyai nilai yang sama dengan salah satu logam induk atau bahkan melebihi kekuatan dari logam induk. Pengujian tarik untuk mengetahui nilai kekuatan tarik dan letak putus suatu sambungan las. Besarnya kekuatan tarik tergantung dari gaya yang diberikan tiap satuan luas. Sesuai dengan rumus :

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2-4)$$

dengan :

A = Luas permukaan penampang (m²)

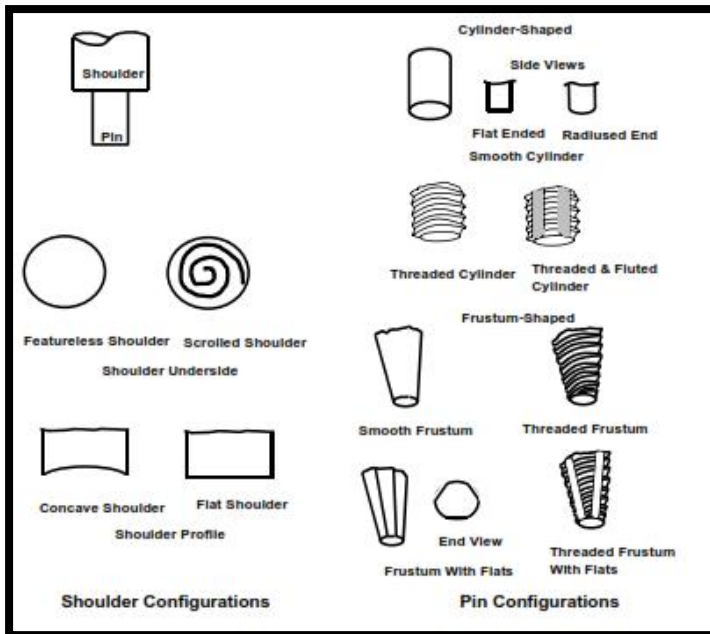
σ = Tegangan tarik (N/m²)

F = Gaya tarik (N)

2.12 Perancangan Tool

Pada awal penemuan *Friction Stir Welding*, tool yang digunakan masih berupa satu silinder utuh dengan bentuk *probe* silinder sederhana. Bentuk *probe* yang sederhana hanya bisa menghasilkan *flow material* dan pencampuran yang terbatas, akibatnya kecepatan pengelasan yang dihasilkan juga rendah (Terry, 2005,p.13). *Heat input* yang didapat dari gesekan tool dengan benda kerja saat dilas sekitar 70% sampai dengan 80% dari temperatur titik lebur benda kerja yang akan dilas. Material dari tool sendiri harus memiliki titik cair dan juga sifat mekanik yang lebih baik dari pada benda kerja, agar saat proses pengelasan berlangsung tool tidak rusak dan tercampur dengan material yang akan dilas. Perancangan tool merupakan salah satu faktor penting yang dapat mempengaruhi sifat mekanik sambungan. Material tool merupakan faktor yang mempengaruhi koefisien gesek, dan *heat input* yang dihasilkan. Oleh sebab itu, perancangan tool merupakan salah satu hal yang harus diperhatikan dari *Friction Stir Welding* .

Semakin berkembangnya ilmu dan teknologi, bentuk – bentuk tool pun semakin bervariasi dengan maksud yang bervariasi pula. Perkembangan tool memiliki perbedaan antara satu dengan yang lain, contohnya pada bentuk pin yang dimiliki. Contoh : *threaded pin*, *Fluted pin* dan *frustum pin* dengan bagian bawah rata ditemukan untuk tujuan memperbaiki kualitas pengelasan, mempercepat *travel speed*, dan menyempurnakan *mixing material*. *Concave shoulder* dan *scroll shoulder* dibuat untuk mengurangi efek *undercutting* dan *flash* pada sambungan yang ditimbulkan akibat bagian bawah tool *shoulder* (Terry, 2005,p.13). Berikut merupakan contoh dari bentuk *shoulder* dan *pin*.



Gambar 2.13 Konfigurasi *Shoulder* dan Pin

Sumber: Terry (2005,p.14)

Perkembangan dalam perancangan *tool* dari yang sederhana menjadi rumit seiring dengan berkembangnya jenis material dari *tool* itu sendiri. Material *tool* dari *Friction Stir Welding* harus mempunyai *wear resistance*, temperatur lebur (*melting point*) yang tinggi, dan efektifitas dalam melepas panas pada saat proses pengelasan berlangsung. (Terry, 2005,p.13)

2.13 Aluminium

Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy dalam tahun 1809 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H.C Oersted pada tahun 1825. Secara industri tahun 1886, aluminium dikembangkan oleh Paul Heroult di Perancis dan C.M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah dan telah memperoleh logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa dari garam yang terfusi. Sampai saat ini metode Heroult Hall masih digunakan dalam produksi aluminium. Penggunaan aluminium adalah tertinggi di dunia diantara logam non fero (Surdia, 1984,p.129).

Aluminium mempunyai beberapa keunggulan jika dibandingkan dengan logam lain. Aluminium termasuk logam ringan yang mempunyai kekuatan tinggi, tahan terhadap karat, dan merupakan konduktor listrik yang cukup baik (Wirjosumarto, 1979,p.113). Pada dunia modern, aluminium diberi logam tambahan seperti Cu, Mn, Si, Mg, Zn, dan Ni untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan memberikan tambahan sifat baik lainnya.

Aluminium memiliki beberapa kelebihan yang melandasi logam ini dipakai dalam kebutuhan industri. Sifat-sifat aluminium yaitu:

1. Ringan

Aluminium tergolong dalam jenis logam yang memiliki berat jenis dengan ringan dengan densitas 2.7 gram/cm^3 , sehingga aluminium banyak dipergunakan dalam pembuatan alat dan benda yang membutuhkan berat ringan dan kekuatan yang baik.

2. Tahan Korosi

Aluminium merupakan salah satu logam yang memiliki daya tahan terhadap korosi yang cukup baik, hal ini disebabkan karena fenomena pasivasi, yaitu pembentukan lapisan aluminium oksida pada lapisan luar aluminium segera setelah logam terpapar oleh udara bebas.

3. Mampu Bentuk Baik

Mudah dibentuk dan memiliki mampu mesin yang baik, dengan adanya sifat ini yang menyebabkan aluminium aplikatif untuk berbagai jenis komponen mesin.

4. Dapat Didaur Ulang

Dapat diproses ulang, kemampuan aluminium untuk didaur ulang dapat mengurangi biaya pembuatan, khususnya saat proses peleburan karena tidak dibutuhkan energi yang terlalu tinggi saat melebur aluminium daur ulang

5. Penghantar Listrik yang Baik

Aluminium memiliki daya hantar listrik yang cukup baik yaitu, kurang lebih 65% dari daya hantar tembaga.

Standarisasi aluminium digunakan untuk menggolongkan logam aluminium paduan berdasarkan komposisi kimia, penetapan standarisasi logam dengan proses pengecoran aluminium menurut *American Standard Testing Materials (ASTM)* mempergunakan angka dalam menetapkan penggolongan aluminium paduan. Sedangkan, komposisi aluminium yang dipakai sebagai berikut : Al : 99.1 % ; Fe : 0.508 % ; Si : 0.132 % ; Mn : 0.0879 % ; Cu : 0.0852 % ; Mg : 0.0189 % ; Ti : 0.0172 % ; Zn : 0.0072 % ; Cr : 0.0012 % ; Lainnya : 0.0424 %.

Tabel 2.1 Sifat Fisik dan Mekanik Aluminium

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	> 99,0
Masa jenis (20°C)	2,6989	2,71
Titik cair	660,2	653-657
Panas jenis (cal/g·°C) (100°C)	0,2226	0,2297
Hantaran listrik (%)	64,94	59 (dianil)
Tahanan listrik koefisien temperatur (/°C)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuaian (20-100°C)	$23,86 \times 10^{-6}$	$23,5 \times 10^{-6}$
Jenis kristal, konstanta kisi	<i>fcc</i> , $a=4,013 \text{ kX}$	<i>fcc</i> , $a=4,04 \text{ kX}$

Catatan: *fcc*: face centered cubic=kubus berpusat muka

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		> 99,0	
	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm ²)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur (0,2%) (kg/mm ²)	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44

Sumber : Surdia (1984,p134)

2.14 Hipotesis

Dari teori yang telah dibahas arah putaran *tool* akan mempengaruhi sifat mekanik pada sambungan temu antar aluminium yang menggunakan metode pengelasan *Double side friction stir welding*, berbedanya arah putaran *tool* pada kedua sisi pelat akan menyebabkan perubahan posisi *advancing side* dan *retreating side* yang akan mempengaruhi kekuatan tarik dan distribusi kekerasan.

BAB III METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan adalah penelitian eksperimental nyata dengan pengamatan secara langsung pada objek yang diteliti dengan mengikuti standar yang sudah ada. Informasi tambahan didapatkan melalui studi literatur terkait dari buku, jurnal penelitian dan internet.

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian akan dilakukan pada bulan April 2018 sampai dengan Mei 2018.

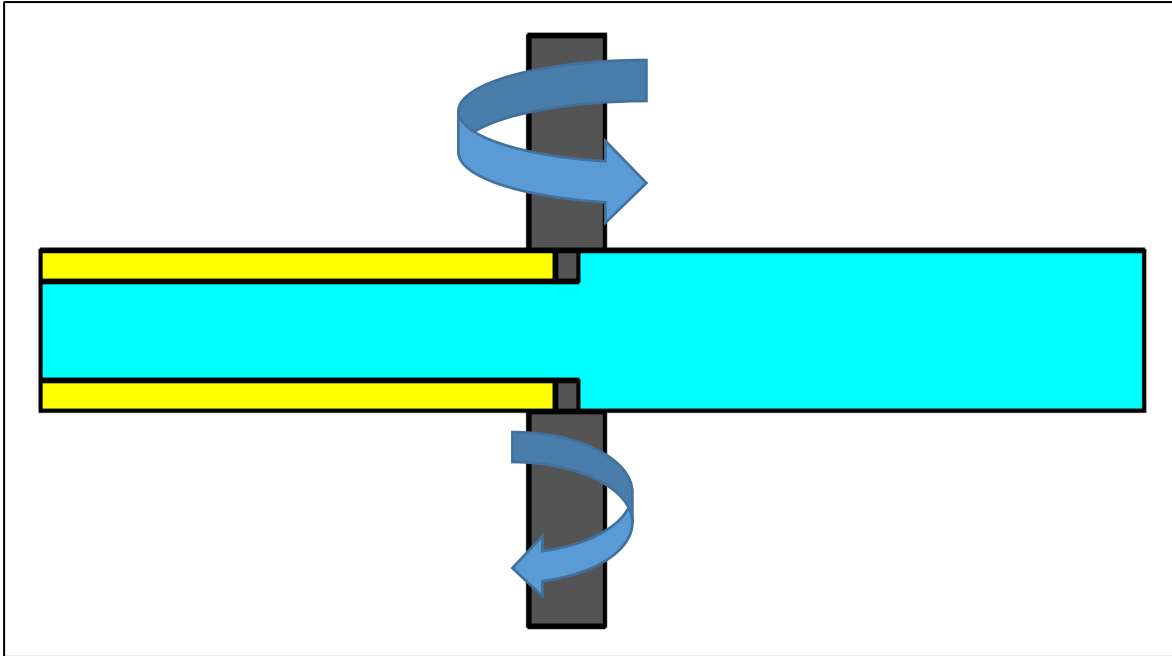
- Pengelasan dilakukan di Laboratorium Proses Manufaktur I Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
- Pengujian kekuatan tarik dilakukan di Laboratorium Pengujian Material Universitas Muhammadiyah Malang
- Pengujian distribusi kekerasan dilakukan di Laboratorium Pengujian Logam Prodi S1 Teknik Mesin Universitas Negeri Malang
- Makrostruktur dilakukan di Laboratorium Pengujian Material Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

3.2 Variabel Penelitian

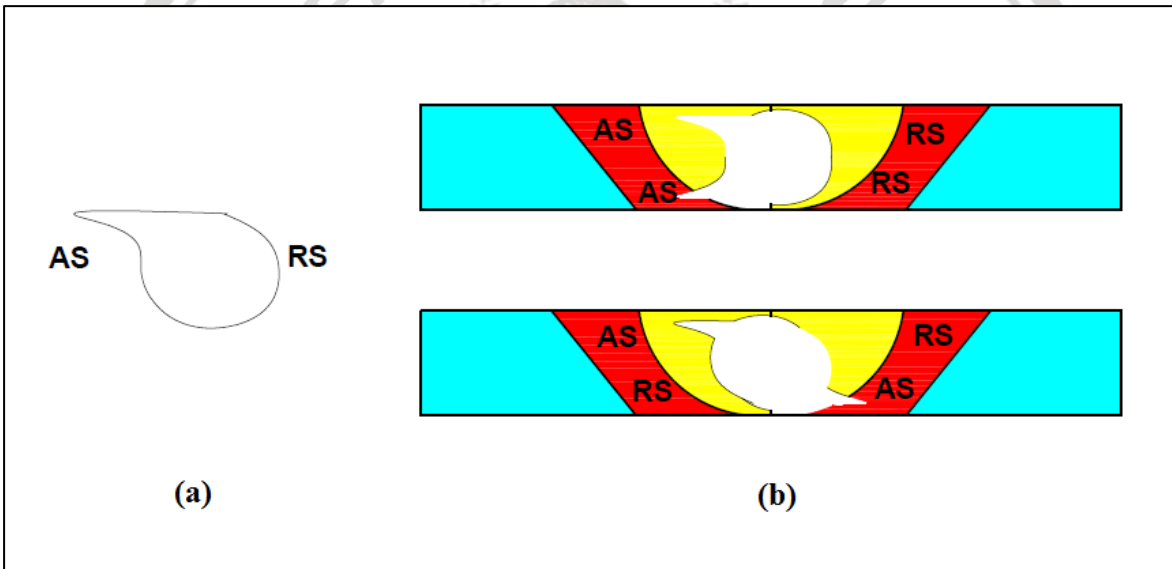
3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang nilainya divariasikan untuk melihat hubungannya terhadap variabel terikat. Pada penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah arah putaran *tool* pada kedua sisi pelat dan untuk melihat kevalidan data dikombinasikan dengan variasi panjang pin *tool* 2.5 mm, 3.5 mm, 4.5 mm, 5.5 mm dan 6.5 mm :

- Arah putaran *clockwise* – *clockwise* untuk semua variasi panjang pin *tool*
- Arah putaran *clockwise* – *counter clockwise* untuk semua variasi panjang pin *tool*



Gambar 3.1 Skema variabel bebas



Gambar 3.2 (a) Ilustrasi *advancing side* dan *retreating side*; (b) Ilustrasi pada hasil pengelasan

3.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variasi nilai variabel bebas pada akhir proses penelitian. Pada penelitian ini variabel terikat adalah kekuatan tarik dan nilai distribusi kekerasan dari spesimen yang dilakukan pengelasan.

3.2.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga tetap agar perubahan variabel terikat hanya dipengaruhi oleh variabel bebas. Variabel terkontrol pada penelitian ini adalah:

- Kecepatan putaran *spindle* adalah 1452 rpm
- Kecepatan pengelasan adalah 24 mm/min
- Titik nol pengelasan tepat pada saat *tool* menyentuh spesimen
- Sudut pengelasan adalah 0^0

3.3 Spesifikasi Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Mesin *Milling Universal*

Mesin *Milling Universal* adalah mesin yang dapat digunakan sebagai mesin *frais* vertikal dan mesin *frais* horizontal. Dalam penelitian ini peneliti menggunakan posisi mesin *frais* vertikal dimana *tool* berada tegak lurus terhadap bidang benda kerja. Fungsi mesin *frais* pada penelitian ini untuk tempat mencekam benda kerja, menggerakkan benda kerja dan sekaligus memutar *tool* sehingga terjadilah proses pengelasan *friction stir welding*. Contoh dan spesifikasi Mesin *Milling Universal* dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Mesin *Milling Universal*

Sumber: Laboratorium Proses Manufaktur I Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

2. Mesin Uji Tarik

Mesin uji tarik merupakan mesin yang berfungsi untuk mengetahui nilai uji tarik dari suatu material yang akan diuji. Benda kerja yang diuji akan dibentuk sesuai dengan *standard* benda uji tarik kemudian dicekam pada mesin uji tarik. Kemudian mesin akan menarik dari gaya terendah hingga gaya terbesar sehingga gaya maksimal yang diterima benda kerja dapat diketahui kekuatan tarik dari suatu benda kerja. Mesin uji tarik yang digunakan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.4 Mesin Uji Tarik

Sumber: Laboratorium Pengujian Material Universitas Muhammadiyah Malang

3. Alat Uji Kekerasan

Alat uji kekerasan digunakan untuk mengukur kekerasan material uji. Pada penelitian ini digunakan pengujian kekerasan Vickers skala mikro.



Gambar 3.5 Alat Uji Kekerasan *Micro Vickers* Eseway EW-412AAT

Sumber: Laboratorium Pengujian Logam Prodi S1 Teknik Mesin Universitas Negeri Malang

4. *Welding Tool*

Tool digunakan untuk menghasilkan gesekan dan mengaduk material permukaan benda kerja. *Tool* pengelasan merupakan modifikasi khusus untuk mesin *frais* vertikal. Material *tool* adalah baja HSS dengan geometri pin *tool flat-end cylindrical* seperti pada gambar 3.6

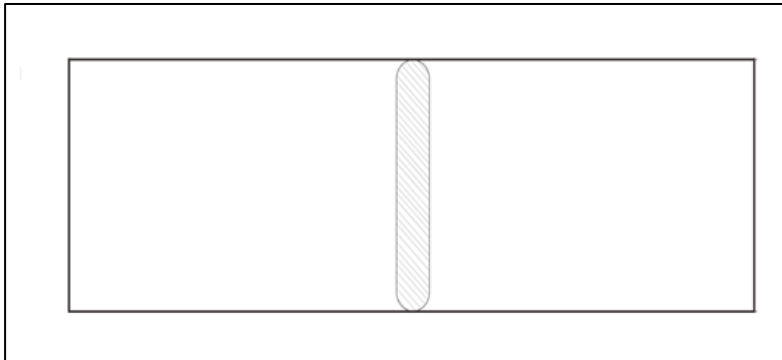


Gambar 3.6 *Tool FSW* dengan pin *flat-end cylindrical*

3.3.2 Bahan

Pada pengelasan *friction stir welding* menggunakan plat aluminium dengan dimensi sebagai berikut:

- Lebar : 250 mm
- Panjang : 150 mm
- Tebal : 7 mm



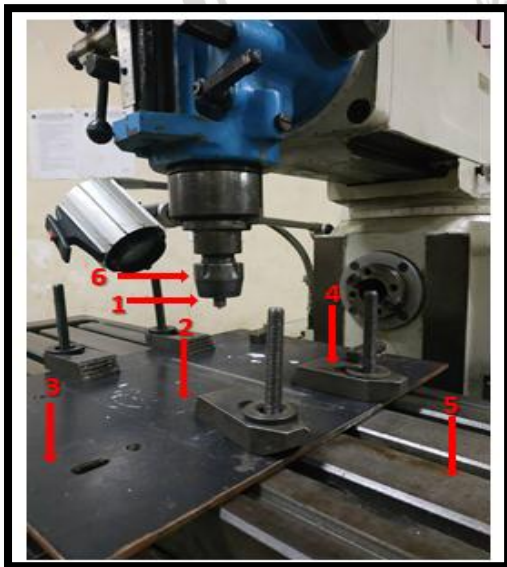
Gambar 3.7 Desain benda kerja setelah dilakukan pengelasan

3.4 Prosedur Penelitian

Prosedur pengelasan, prosedur pengujian makrostruktur dan kekerasan dilakukan sesuai SOP alat dan laboratorium, prosedur pengujian kekuatan tarik menggunakan standar AWS B4.

3.4.1 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian adalah pada gambar berikut.



Gambar 3.8 Skema Instalasi Penelitian

Keterangan:

1. Tool Pengelasan
2. Lokasi Penempatan Kerja
3. Landasan Benda Kerja
4. Pencekam Benda Kerja
5. Meja Mesin
6. Pencekam Tool Pengelasan

3.4.2 Prosedur Pra-Penelitian

Prosedur pra-penelitian sebelum dilakukan proses pengelasan adalah:

1. Mengumpulkan alat dan bahan baik dari prosedur pengelasan maupun pengujian
2. Menguji komposisi aluminium untuk melihat persentase logam dan paduan
3. Mempersiapkan pelat aluminium sesuai dengan desain untuk pengelasan
4. Mempersiapkan *tool* pengelasan dari silinder HSS sesuai dengan desain
5. Mempersiapkan seluruh instalasi penelitian.

3.4.3 Prosedur Proses Pengelasan

Proses pengelasan dilakukan sebanyak jumlah variabel bebas yaitu lima kali. Langkah-langkah yang digunakan dalam proses pengelasan adalah:

1. Mempersiapkan mesin frais pada posisi vertikal.
2. Mempersiapkan instalasi penelitian agar penempatan benda kerja sesuai pada posisi pengelasan.
3. Memasang benda kerja yang akan dilas pada instalasi penelitian yang telah dipersiapkan.
4. Memasang *tool* pengelasan pada pencekam *tool* pada mesin *milling*.
5. Posisi pengelasan yang digunakan adalah posisi horizontal.
6. Mengatur kecepatan *spindle*, kecepatan translasi pengelasan dan *plunge depth*
7. Melakukan proses pengelasan *friction stir welding*.
8. Melepas benda kerja dan membalik permukaan benda kerja pada sisi sebaliknya.
9. Ulangi poin 7 dan setelah selesai lepas benda kerja.
10. Mematikan mesin dan melepaskan benda kerja yang sudah selesai dilas dari instalasi penelitian.
11. Memberikan tanda pada benda kerja sesuai parameter yang diterapkan pada proses pengelasan benda kerja tersebut.
12. Lakukan poin 3-11 sesuai banyaknya variabel bebas penelitian.

3.4.4 Prosedur Makrostruktur Hasil Sambungan

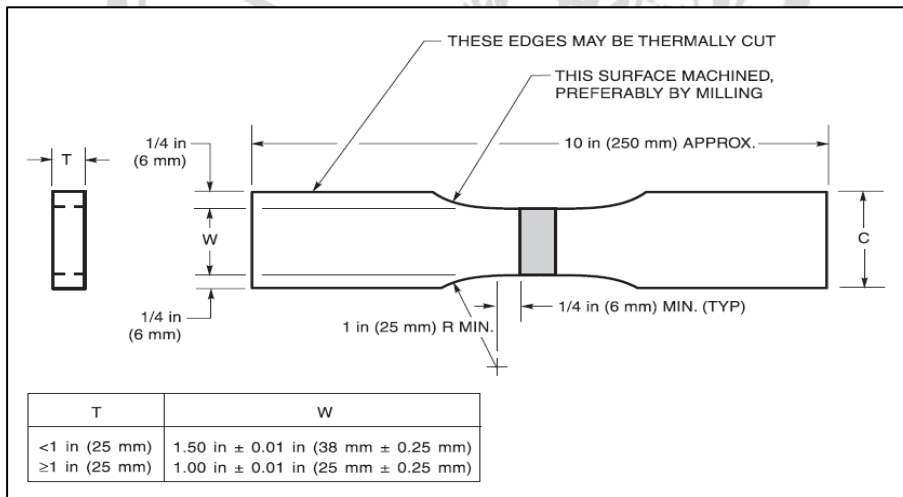
Makrostruktur dilakukan dengan mengambil foto pada daerah hasil sambungan pengelasan dengan langkah pengujian sebagai berikut.

1. Siapkan ketiga benda kerja yang sudah dilas dan bersihkan permukaannya.
2. Benda kerja dipotong tegak lurus arah pengelasan tepat di sambungan las.
3. Bersihkan benda kerja dari minyak dan debu.

4. Kurangi dimensi benda kerja menjadi panjang 10 mm lebar 10 mm dan tebal 7 mm
5. Untuk hasil potongan yang tidak rata dan halus terlebih dahulu lakukan *grinding* dan *polishing*
6. Etsa permukaan benda dengan larutan HF selama 60-65 detik
7. Pasang benda kerja pada posisi tegak lurus
8. Lakukan pengujian
9. Ulangi langkah 1-8 sesuai banyaknya variabel bebas penelitian

3.4.5 Prosedur Pengujian Kekuatan Tarik

Spesimen hasil pengelasan pada mulanya berbentuk persegi panjang terlebih dahulu kemudian dibentuk dengan mesin *CNC* menjadi spesimen uji tarik dengan standart yang ada. Tujuan pembentukan ini untuk memusatkan terjadinya patahan dan tertuju pada sambungan dan nantinya dapat diketahui nilai kekuatan tarik pada sambungan las tersebut. Spesimen yang digunakan adalah plat aluminium dengan tebal 7 mm selanjutnya dibentuk sesuai dengan standart AWS B4.



Gambar 3.9 Dimensi Spesimen Pengujian Tarik

Sumber: AWS B4 (2007,p.4)

Prosedur pengujian tarik pelat hasil pengelasan adalah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan benda kerja sesuai standar pengujian
2. Pengaturan posisi ragum pada mesin uji tarik agar posisi saat mencekan rata atau seimbang.
3. Kemudian benda kerja dijepit pada pencekam mesin uji tarik.

4. Benda uji mendapatkan gaya tarik yang diawali 0 kgf dan terus bertambah hingga putus pada beban maksimum yang dapat ditahan oleh benda kerja.
5. Untuk setiap pertambahan panjang catat besar gaya
6. Mengolah data gaya dan pertambahan panjang ke bentuk grafik
7. Foto hasil patahan dengan kamera makro untuk analisis gambar

3.4.6 Prosedur Pengujian *Microhardness*

1. Spesimen dipotong tepat tegak lurus arah pengelasan pada sambungan las
2. Benda kerja dibersihkan dari minyak dan debu
3. Kurangi dimensi benda kerja menjadi panjang 30 mm lebar 10 mm dan tebal 7 mm
4. Untuk hasil potongan yang tidak rata dan halus lakukan *grinding* dan *polishing*
5. Pasang benda kerja dan atur perbesaran dan fokus
6. Lakukan indentasi pertama pada titik nol sambungan
7. Ambil gambar jejak indentasi (diagonal) dengan mikroskop untuk mengetahui nilai kekerasan (HV)
8. Setelah mengetahui diagonal indentasi pertama, indentasi kedua dilakukan pada interval 1 mm
9. Olah data kekerasan menjadi grafik distribusi kekerasan

3.5 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian digunakan agar dapat mencari pengaruh arah putaran *tool* pada proses pengelasan *double side friction stir welding* terhadap kekuatan tarik dan distribusi kekerasan pada hasil pengelasan aluminium.

3.5.1 Analisis Data

Pengujian ini meliputi pengujian kekuatan tarik dan distribusi kekerasan pada material pelat aluminium yang dilakukan pengelasan *double-sided friction stir welding* (DFSW).

3.5.2 Analisis Grafik

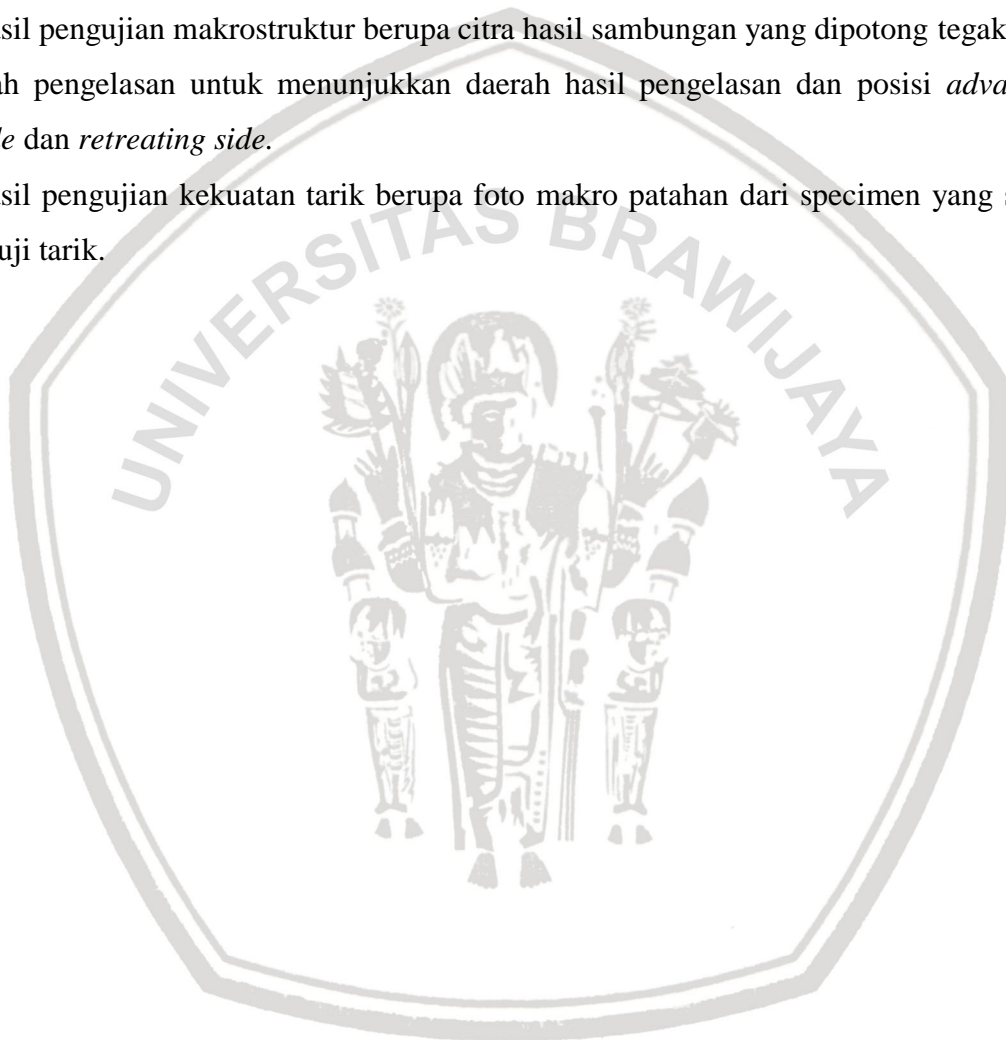
Pada analisis grafik dilakukan dengan bantuan *microsoft excel*. Analisis grafik dilakukan dengan pengamatan yang melihat perubahan data pada grafik yang diperoleh dari plotting data. Pada penelitian ini digunakan dua grafik yaitu:

1. Grafik pengaruh arah putaran *tool* terhadap kekuatan tarik hasil sambungan las dengan sumbu X adalah variasi panjang pin dalam mm dan Y nilai kekuatan tarik (Mpa) dengan dua *series* grafik untuk variasi arah putaran *tool*.
2. Grafik distribusi kekerasan, dengan sumbu X adalah interval titik pengujian dari titik 0 *weld line* sampai tepi *weld nugget* dan sumbu Y adalah nilai kekerasan skala Vickers.

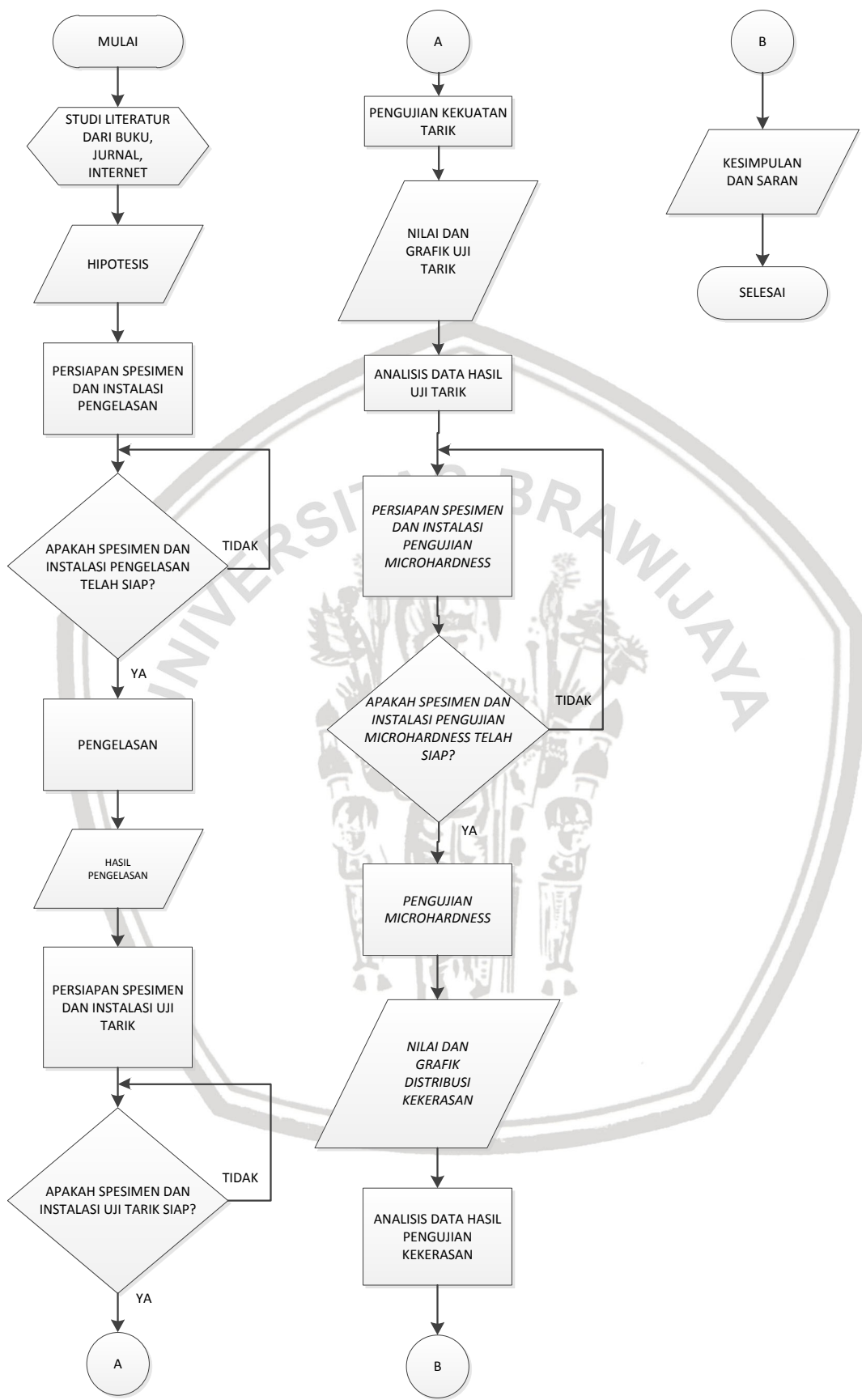
3.5.3 Analisis Gambar

Analisis gambar meliputi analisis makrostruktur dan kekuatan tarik.

1. Hasil pengujian makrostruktur berupa citra hasil sambungan yang dipotong tegak lurus arah pengelasan untuk menunjukkan daerah hasil pengelasan dan posisi *advancing side* dan *retreating side*.
2. Hasil pengujian kekuatan tarik berupa foto makro patahan dari specimen yang sudah di uji tarik.



3.6 Diagram Alir



Gambar 3.10 Diagram Alir Penelitian





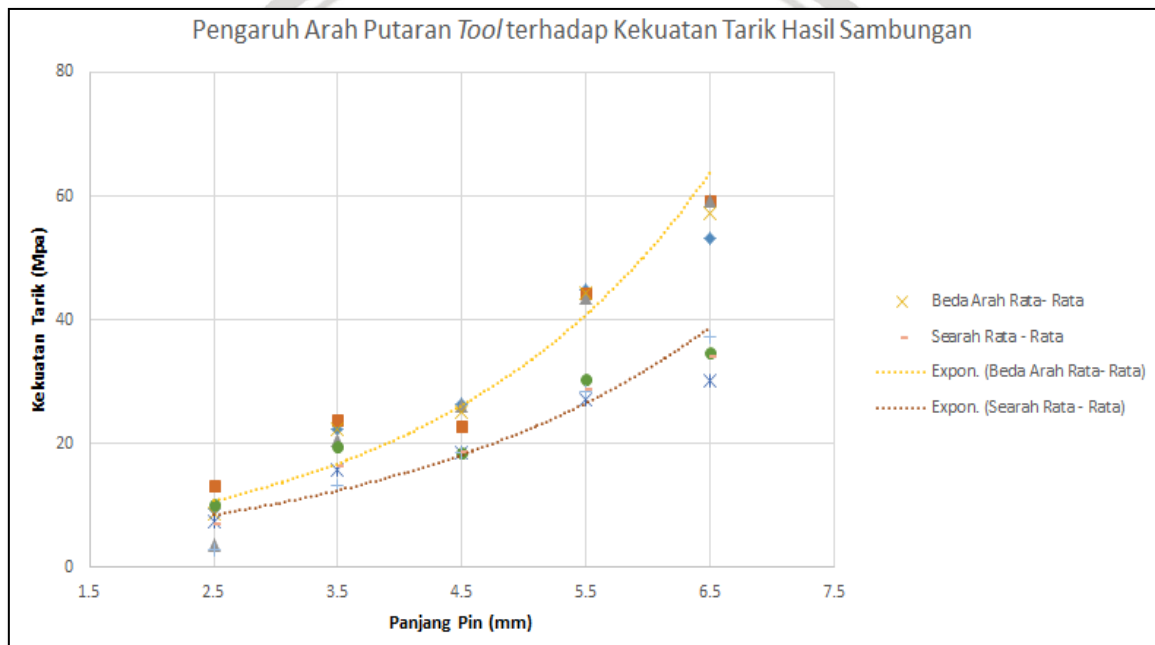
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Data yang diambil dari penelitian ini merupakan data hasil uji tarik sambungan aluminium DFSW dan nilai distribusi kekerasan dengan variasi arah putaran *tool* yang dikombinasikan dengan panjang pin.

4.2 Analisa dan Pembahasan

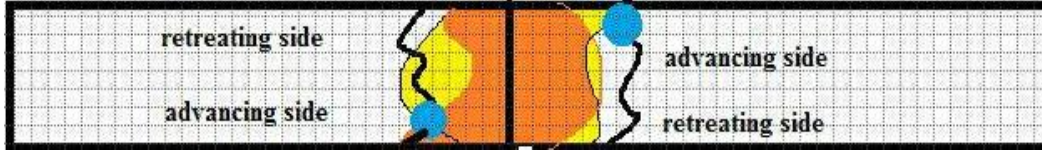
4.2.1 Pengaruh Arah Putaran terhadap Kekuatan Tarik



Gambar 4.1 Grafik Hubungan Arah Putaran *Tool* Terhadap Kekuatan Tarik

Dari gambar 4.1 didapatkan hasil perhitungan kekuatan tarik untuk bertambahnya panjang pin didapatkan nilai kekuatan tarik yang terus meningkat karena semakin banyak deformasi plastis utamanya pada daerah *weld nugget* yang luasannya semakin meningkat akibat dari panjang pin. Deformasi plastis yang terjadi di daerah *advancing side* akan menurunkan ukuran butir dan aliran material plastis akan mengalir dan menumpuk ke daerah ini sehingga menyebabkan nilai kekerasannya lebih tinggi. Arah adukan yang berbeda menghasilkan ikatan butir yang lebih homogen sehingga posisi dari *advancing side* dan *retreating side* bersilangan. Apabila terjadi inisiasi patahan yang merambat pada daerah *retreating side*, rambatan ini akan dihambat oleh daerah *advancing side* yang

memiliki nilai kekerasan lebih tinggi untuk itu gaya yang harus diberikan agar slip bisa merambat diantara batas butir akan semakin besar sehingga kekuatan tariknya akan meningkat.

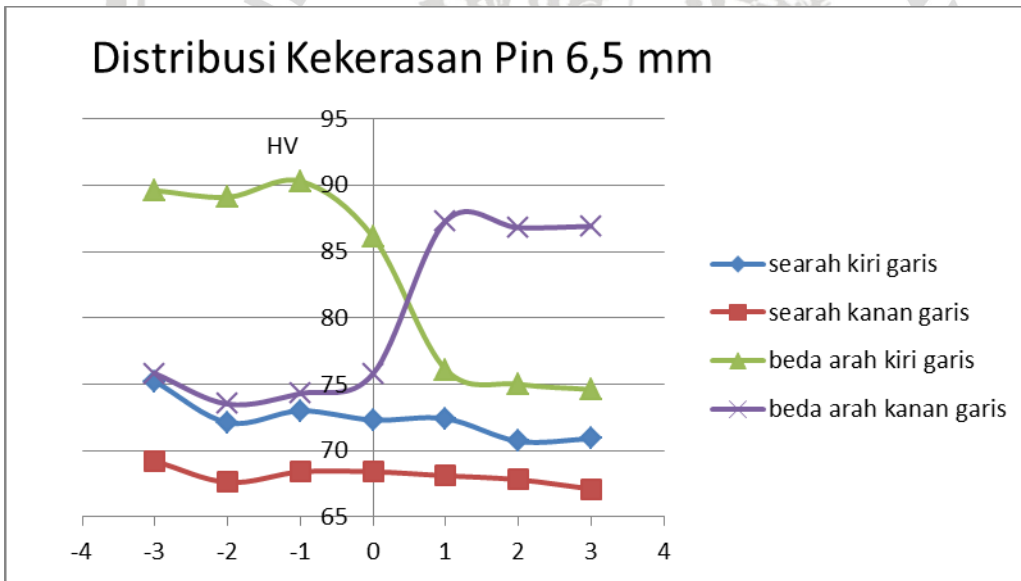


Gambar 4.2 Visualisasi *advancing side* dan *retreating side* pada putaran *tool* yang berbeda arah

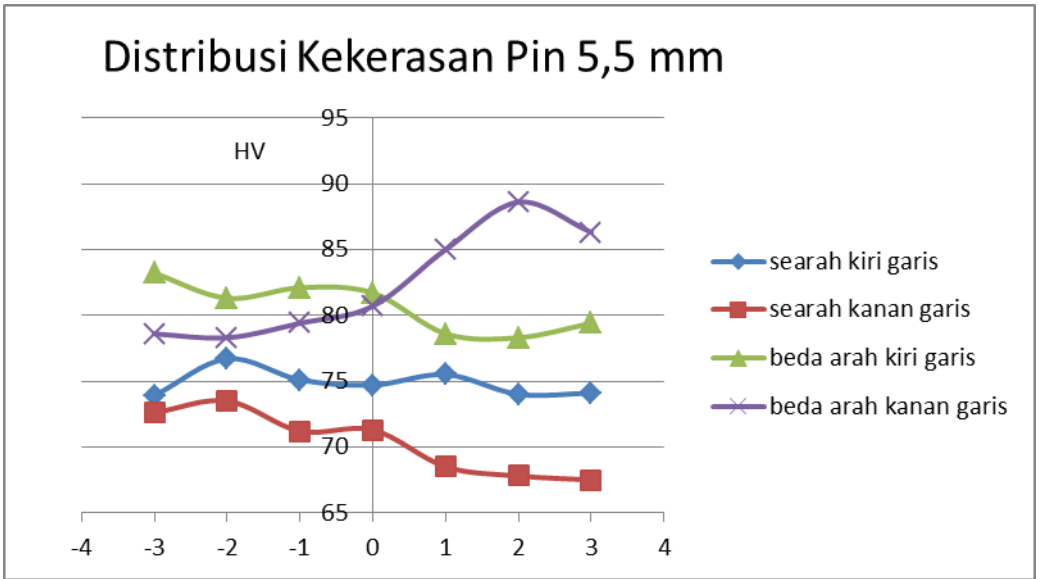


Gambar 4.3 Visualisasi *advancing side* dan *retreating side* pada putaran *tool* yang searah

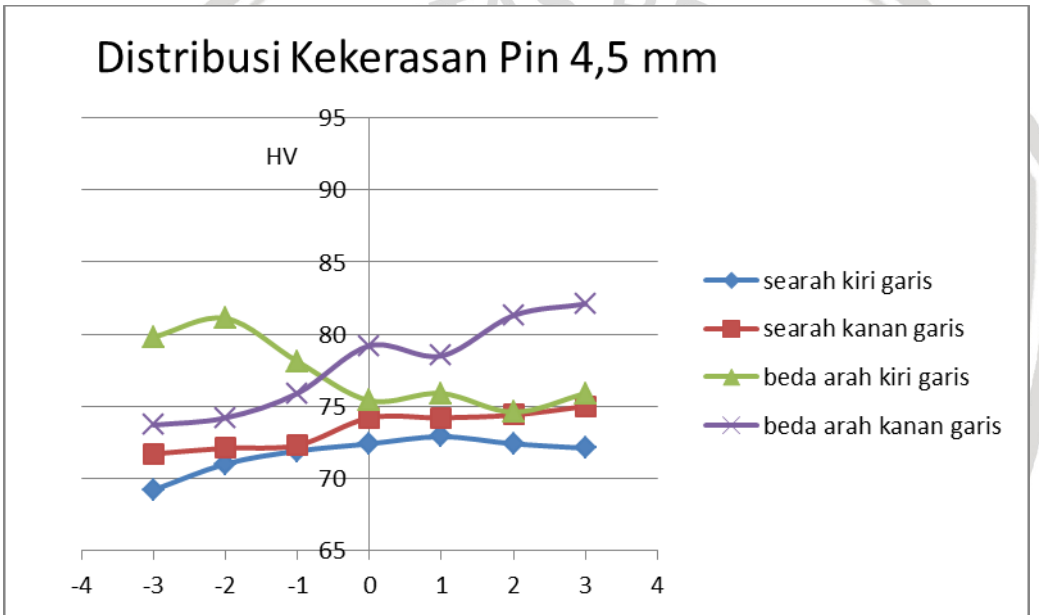
4.2.2 Pengaruh Arah Putaran terhadap Distribusi Kekerasan



(a)

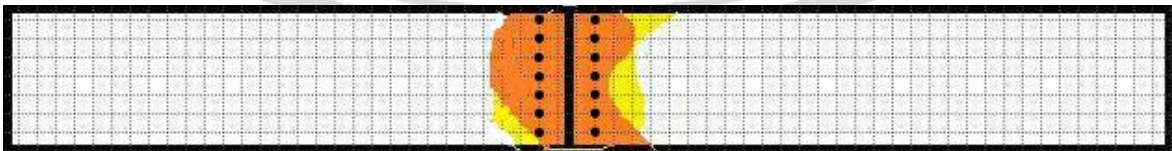


(b)



(c)

Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Arah Putaran terhadap Distribusi Kekerasan (a) pin 6,5 mm (b) pin 5,5 mm (c) pin 4,5 mm

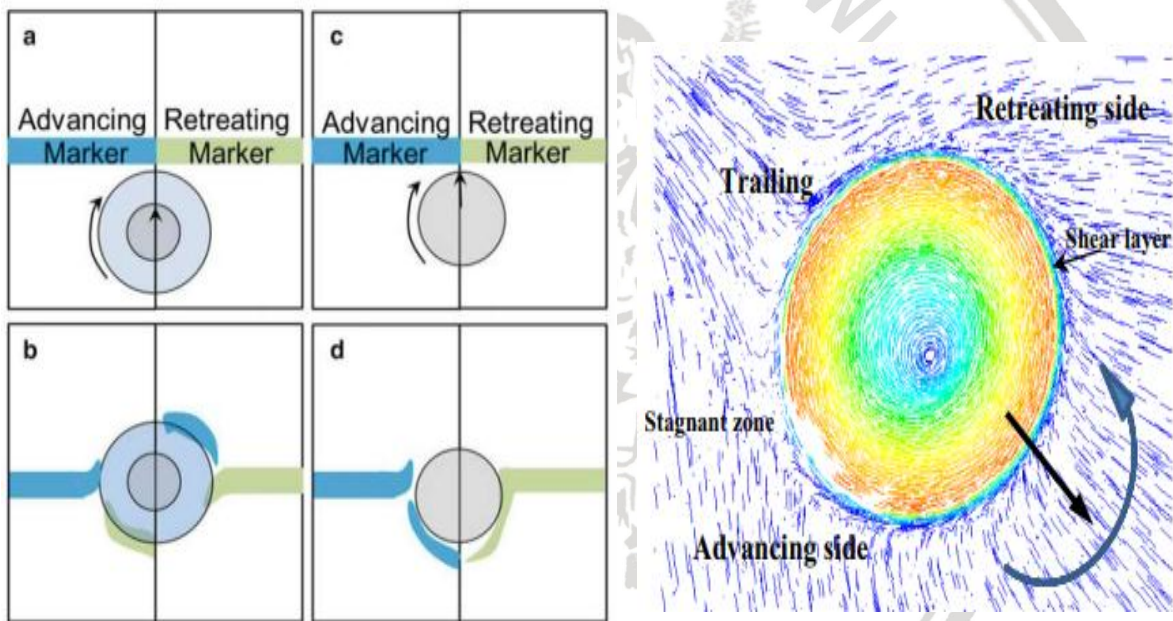


Gambar 4.5 Titik pengambilan data kekerasan pada spesimen

Untuk membuktikan meningkatnya deformasi plastis di daerah *advancing side* maka dilakukan pengujian kekerasan spesimen yang sudah disambung sebanyak tujuh titik. Pengujian dilakukan pada titik 0 atau setengah dari tebal pelat dan 3 titik lainnya

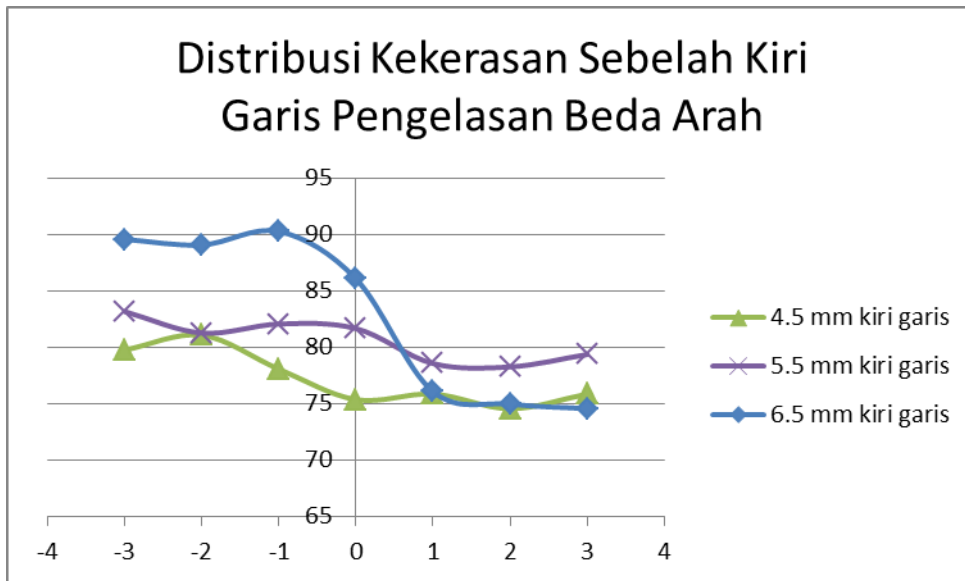


yang kedudukannya dibawah dan diatas tebal pelat dengan jarak masing-masing 1 mm (-3,-2,-1,0,1,2,3) pada sebelah kanan dan kiri dari garis pengelasan (gambar 4.5). Dapat dilihat pada gambar a-c bahwa nilai kekerasan pada spesimen dengan arah putaran *tool* yang searah memiliki nilai kekerasan lebih rendah dari spesimen dengan arah putaran *tool* yang berbeda dikarenakan pada pengelasan dengan arah putaran yang searah untuk daerah *retreating side* yang berada pada kedudukan yang sejajar begitu juga dengan daerah *advancing side* juga sejajar diperjelas dengan grafik yang putaran searah grafiknya sejajar dan tidak berpotongan dikarena posisi dari *retreating side* dan *advancing side* sejajar, sedangkan untuk spesimen dengan arah putaran yang berbeda untuk daerah *retreating side* bersilangan posisinya dengan *advancing side* lainnya, di grafik juga menunjukkan bahwa daerah *advancing side* yang juga bersilangan dengan *retreating side* lainnya pada sisi sebelah dari spesimen sehingga grafik yang terbentuk berpotongan.

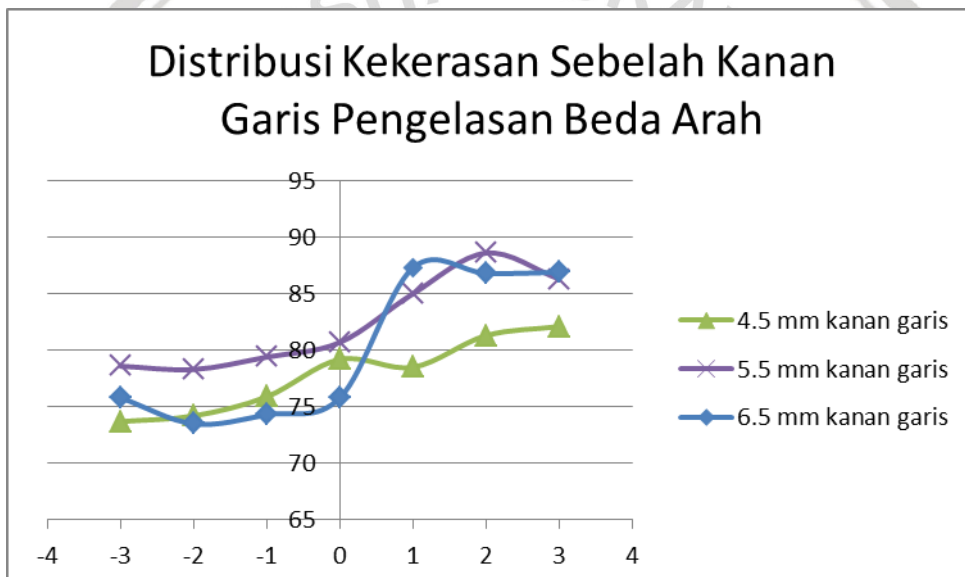


Gambar 4.6 Aliran Material pada saat Proses Pengelasan

Dari gambar diatas menggambarkan bahwa pada proses pengelasan terjadi proses perpindahan massa dimana massa dari material yang digabungkan ini mengalir dari *retreating side* ke *advancing side* sehingga material akan menumpuk di daerah *advancing side* dan menurunkan ukuran butir yang menyebabkan nilai kekerasannya lebih tinggi. Untuk yang beda arah putaran *tool* memiliki nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan dengan yang searah dikarenakan adukan dari *tool* yang menyebabkan ikatan antar butiran semakin homogen.



(a)

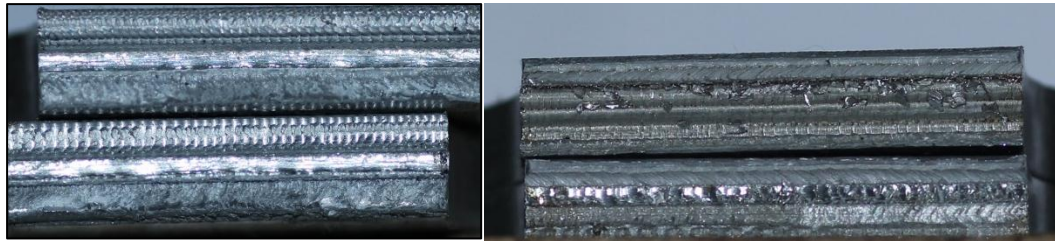


(b)

Gambar 4.7 Grafik Distribusi Kekerasan (a) sisi sebelah kiri garis pengelasan (b) sisi sebelah kanan garis pengelasan.

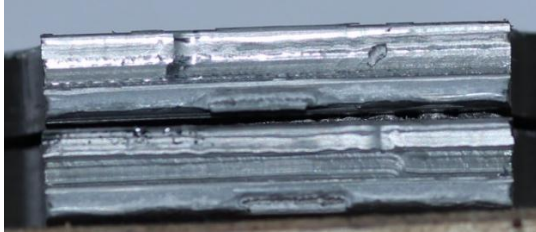
Dari grafik diatas menggambarkan bahwa nilai kekerasan cenderung meningkat dengan adanya penambahan panjang pin. Deformasi plastis yang meningkat akan menyebabkan *strain-hardening* pada material yang ditandai dengan naiknya tegangan *yield* dan juga kekerasan material. Dengan bertambahnya panjang pin dan pengelasan dikedua sisi pada material maka akan menimbulkan daerah *interference zone* yang memiliki butiran dengan ukuran lebih halus akibat dari pengulangan adukan pada saat proses pengelasan sehingga nilai kekerasannya meningkat.

4.2.3 Analisis Foto Hasil Patahan Pengujian Kekuatan Tarik

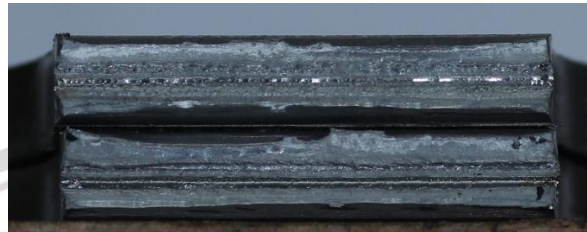


(a)

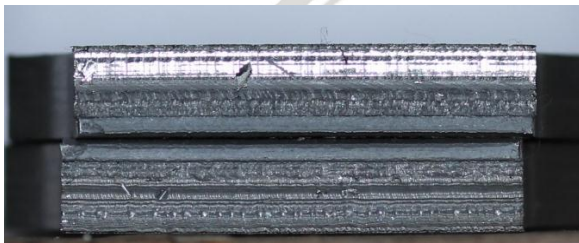
(b)



(c)



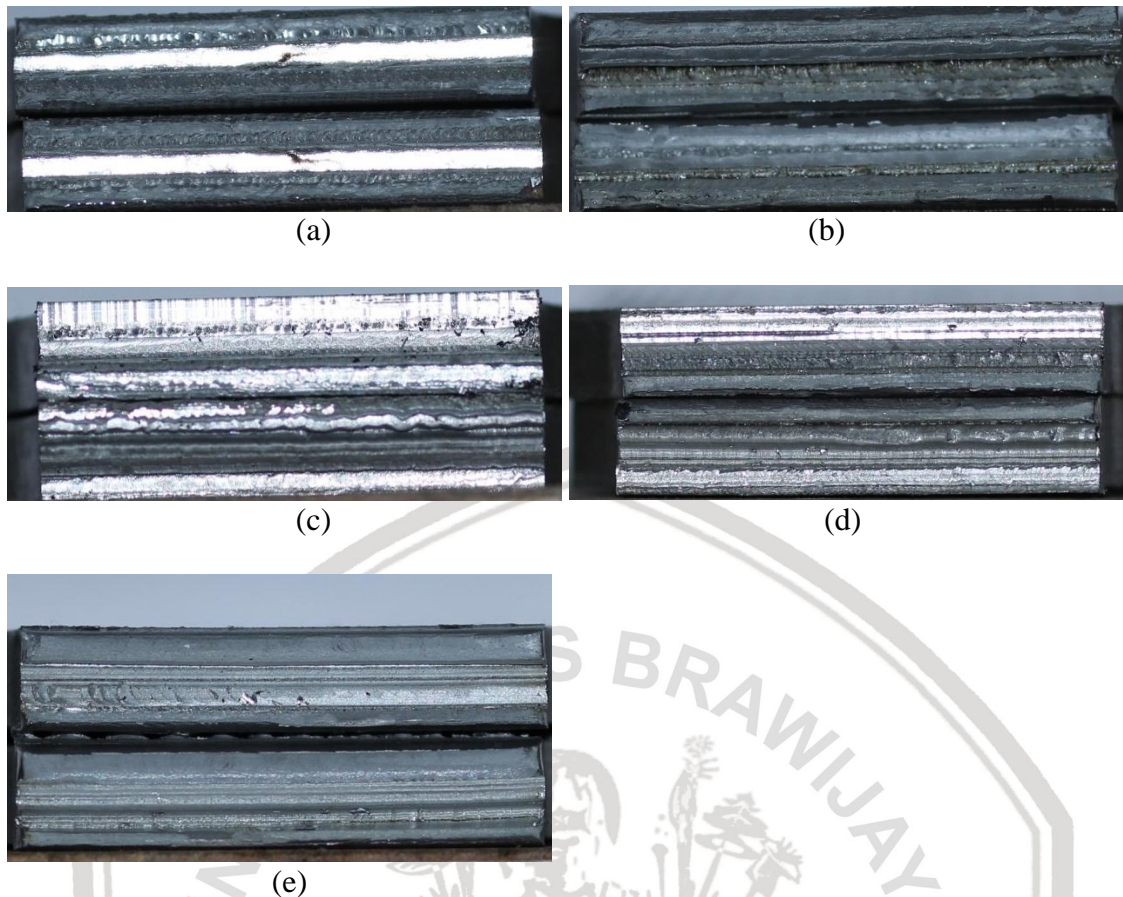
(d)



(e)

Gambar 4.8 Penampang Hasil Patahan Spesimen Pengujian Tarik dengan Variasi Panjang Pin (a) 6,5 mm (b) 5,5 mm (c) 4,5 mm (d) 3,5 mm (e) 2,5 mm Searah Putaran Tool

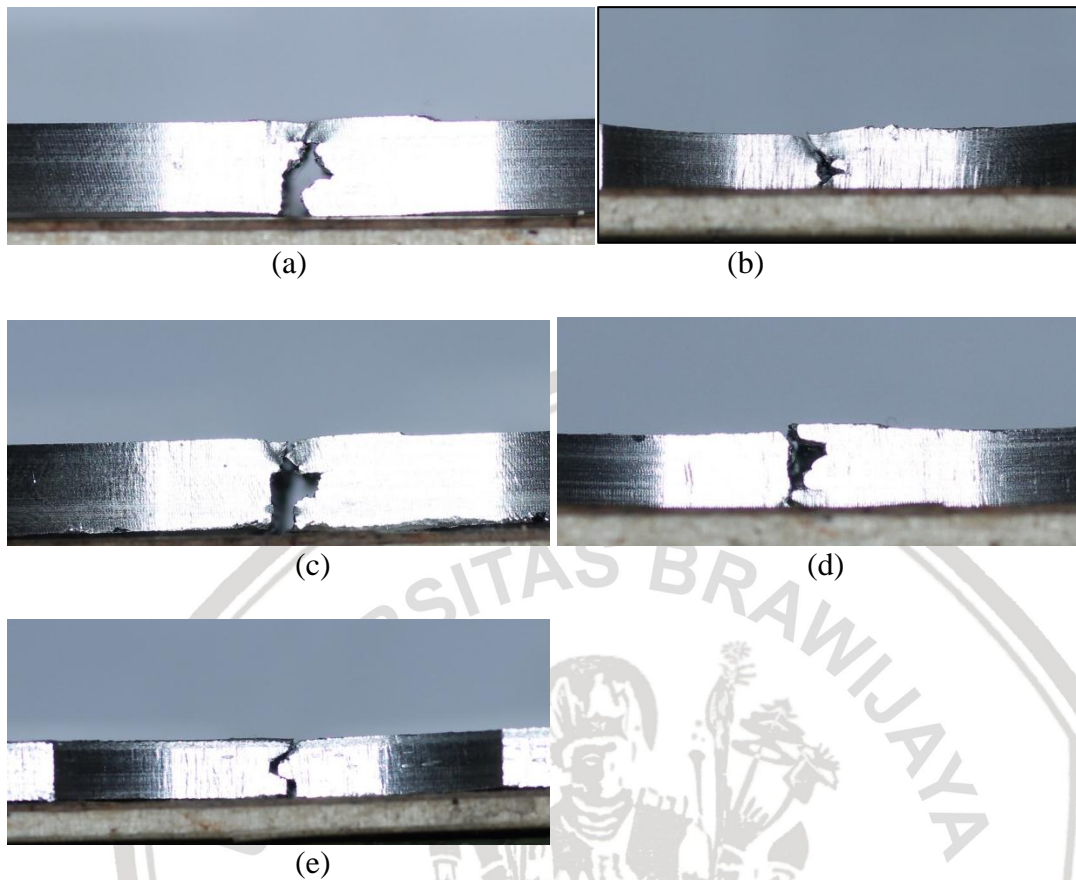
Pada penampang 6,5 sampai 4,5 dapat dilihat pada tengah pelat terdapat bagian dengan struktur yang lebih rata dan halus dibandingkan bagian atas dan bawah. Hal ini menunjukkan kekerasan yang lebih tinggi dan menghasilkan struktur patahan getas. Pada penampang 3,5 dan 2,5 mm didapatkan struktur yang lebih merata, untuk spesimen penampang 3,5 mm terjadi struktur patahan ulet dan pada spesimen 2,5 mm terjadi patahan getas. Hal ini dikarenakan pada penampang 3,5 dan 2,5 mm tidak terdapat daerah *interference zone* yang kekerasannya lebih tinggi sehingga kekuatan sambungan yang dihasilkan lebih merata. Pada penampang patahan dengan panjang pin 2,5 mm di bagian tengah pelat lebih halus dari penampang di 4,5 sampai 6,5 dikarenakan pada penampang 2,5 terjadi *kissing bond* dengan kata lain tidak adanya ikatan metalurgi pada daerah antara pelat yang akan disambung, sehingga saat terjadi beban tarik sambungan akan patah secara getas lalu terlepas.



Gambar 4.9 Penampang Hasil Patahan Spesimen Pengujian Tarik dengan Variasi Panjang Pin (a) 6,5 mm (b) 5,5 mm (c) 4,5 mm (d) 3,5 mm (e) 2,5 mm Beda Arah Putaran Tool

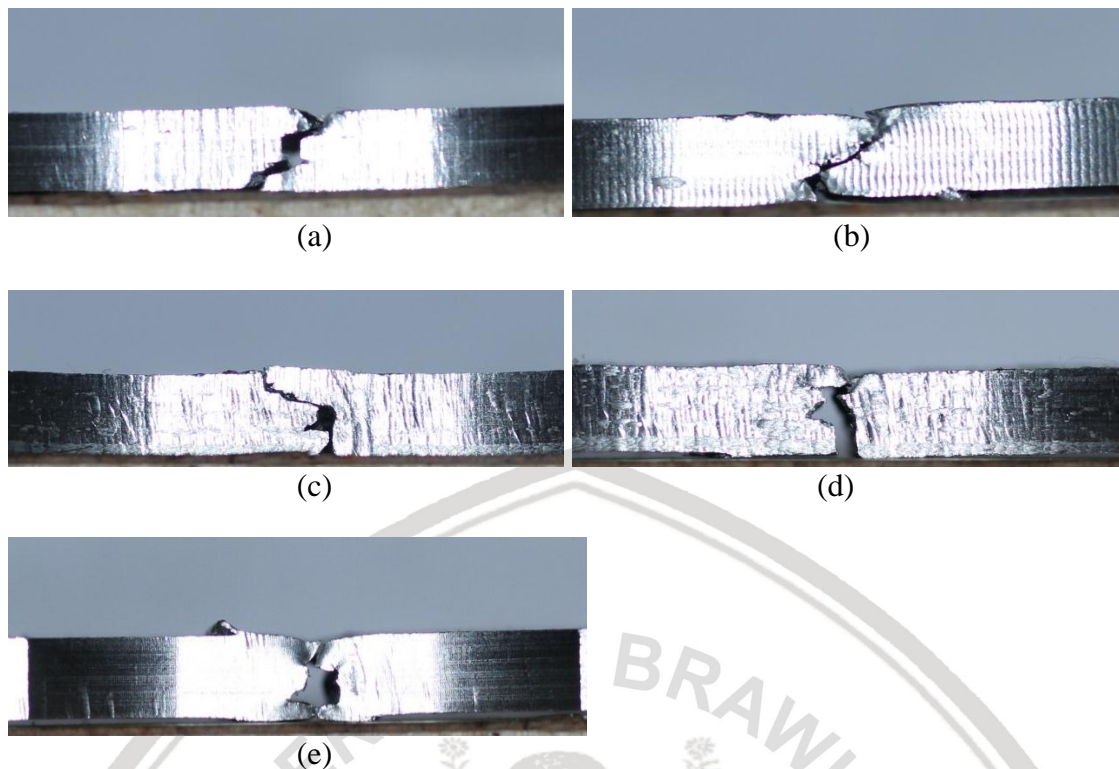
Pada penampang 6,5 sampai 4,5 dapat dilihat pada tengah pelat terdapat bagian dengan struktur yang lebih rata dan halus dibandingkan bagian atas dan bawah yang diakibatkan oleh arah adukan yang berbeda sehingga butirannya heterogen dan nilai kekerasan yang lebih tinggi sehingga menghasilkan struktur patahan yang getas. Pada penampang 3,5 dan 2,5 mm didapatkan struktur yang lebih merata. Hal ini dikarenakan pada penampang 3,5 dan 2,5 mm tidak terdapat daerah *interference zone* pada *weld nugget*. Pada penampang 2,5 mm di bagian tengah pada hasil lasan terlihat jauh lebih halus dari penampang di 4,5 sampai 6,5 dikarenakan pada penampang 2,5 tidak terjadi ikatan metalurgi pada bagian tengah pelat akibat panjang pin yang penetrasi kurang dari setengah tebal pelat.

4.2.4 Analisis Foto Hasil Patahan Pengujian Kekuatan Tarik



Gambar 4.10 Tampak Samping Patahan Spesimen Pengujian Tarik dengan Variasi Panjang Pin (a) 6,5 mm (b) 5,5 mm (c) 4,5 mm (d) 3,5 mm (e) 2,5 mm Searah Putaran Tool

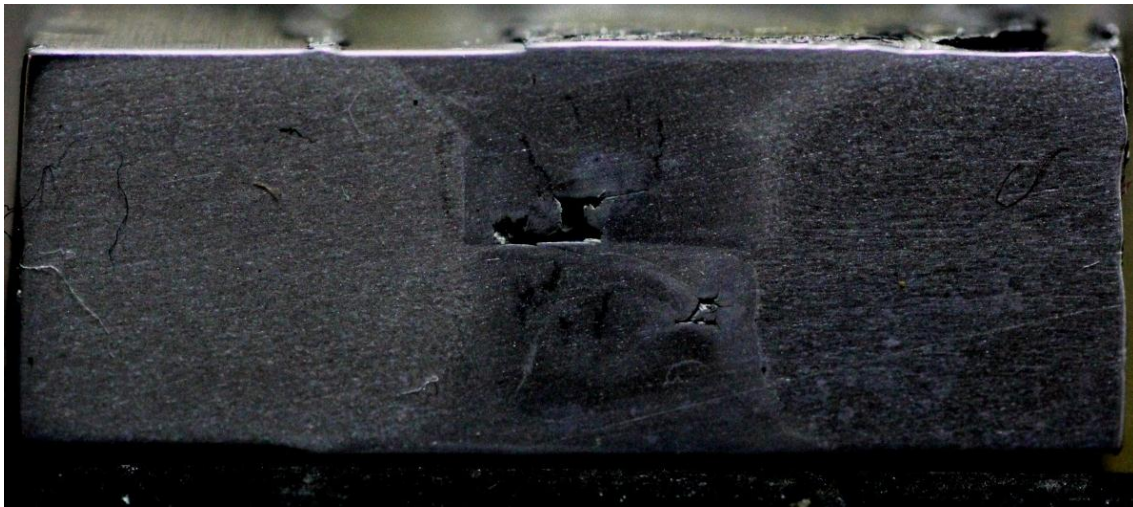
Pada patahan spesimen 6,5 sampai 4,5 dapat dilihat pada bagian atas dan bawah sambungan mengalami *necking* yang mengindikasikan bagian yang lebih *ductile* dibandingkan bagian tengah pelat yang mengalami patahan yang lebih getas dilihat dari tidak terbentuknya sudut dan langsung mengalami kerusakan. Pada patahan spesimen panjang pin 3,5 mm terjadi *necking* di satu sisi pelat yang seragam dikarenakan pengelasannya dengan penetrasi penuh. Namun pada patahan spesimen 2,5 mm ditemukan hasil patahan yang rapi dimana *necking* hanya terjadi di bagian atas sambungan kemudian terjadi patahan yang getas pada bagian tengah. Dari gambar ditunjukkan patahan terkonsentrasi pada batas dari daerah lasan dan logam induk, kekuatannya lemah dan pada bagian tengah pelat kedua benda hanya terlepas dengan mudah akibat tidak adanya ikatan material. Semua patahan terjadi dibatas antara logam induk dan weld nugget yang membuktikan hasil sambungan jauh lebih kuat.



Gambar 4.11 Tampak Samping Patahan Spesimen Pengujian Tarik dengan Variasi Panjang Pin (a) 6,5 mm (b) 5,5 mm (c) 4,5 mm (d) 3,5 mm (e) 2,5 mm Beda Arah Putaran Tool

Pada patahan spesimen 6,5 sampai 4,5 dapat dilihat hasil patahannya terjadi pada daerah *retreating side* bukan pada daerah *advancing side*. Pada patahan spesimen 3,5 bagian atas dan bawah sambungan mengalami *necking* dikarenakan pengelasan dilakukan dengan panjang pin yang penetrasi penuh. Pada patahan spesimen 2,5 ditemukan hasil patahan yang dimana *necking* terjadi di bagian atas dan bawah sambungan kemudian terjadi patahan yang getas pada bagian tengah, hasil sambungan yang tidak menyeluruh sehingga bagian tengah pelat tidak mengalami ikatan metalurgi dan sambungannya terlepas bukan tertarik.

4.2.5 Analisis Makrostruktur Hasil Sambungan



Gambar 4.12 Makrostruktur Hasil Sambungan Las Pada Variasi Panjang Pin 3,5 mm beda arah



Foto makrostruktur hasil sambungan las pada spesimen diatas adalah penampang dari daerah hasil lasan yang diberi perlakuan etsa. Pada bagian sambungan nampak struktur *Weld Nugget* yang lebih halus dibandingkan logam induk dan terbentuknya daerah *retreating side* dan *advancing side* yang berseberangan seperti yang digambarkan pada ilustrasi diatas. Untuk logam induk terlihat memiliki struktur yang lebih kasar. Adanya kerusakan di bagian tengah disebabkan oleh adanya *void* berupa *wormhole* yang bertambah luas akibat proses permesinan.



Gambar 4.13 Makrostruktur Hasil Sambungan Las Pada Variasi Panjang Pin 3,5 mm searah

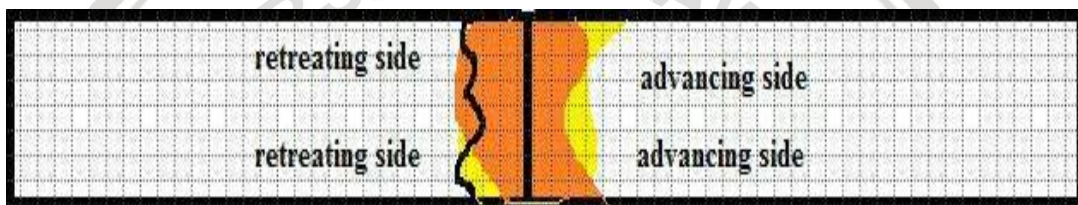
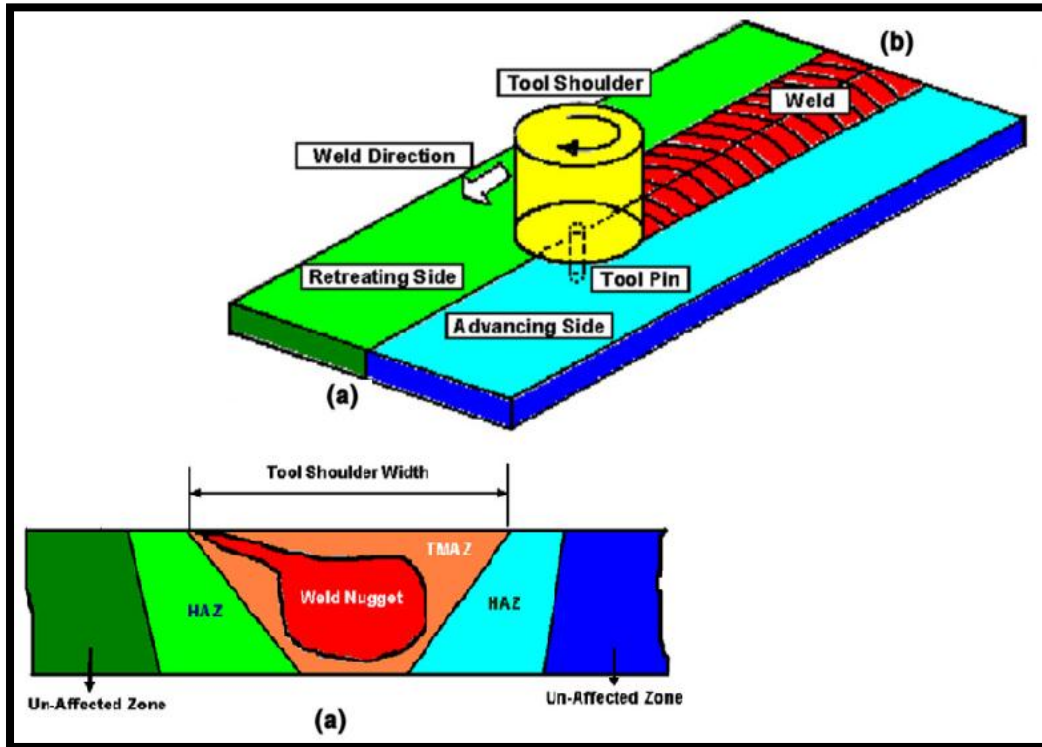
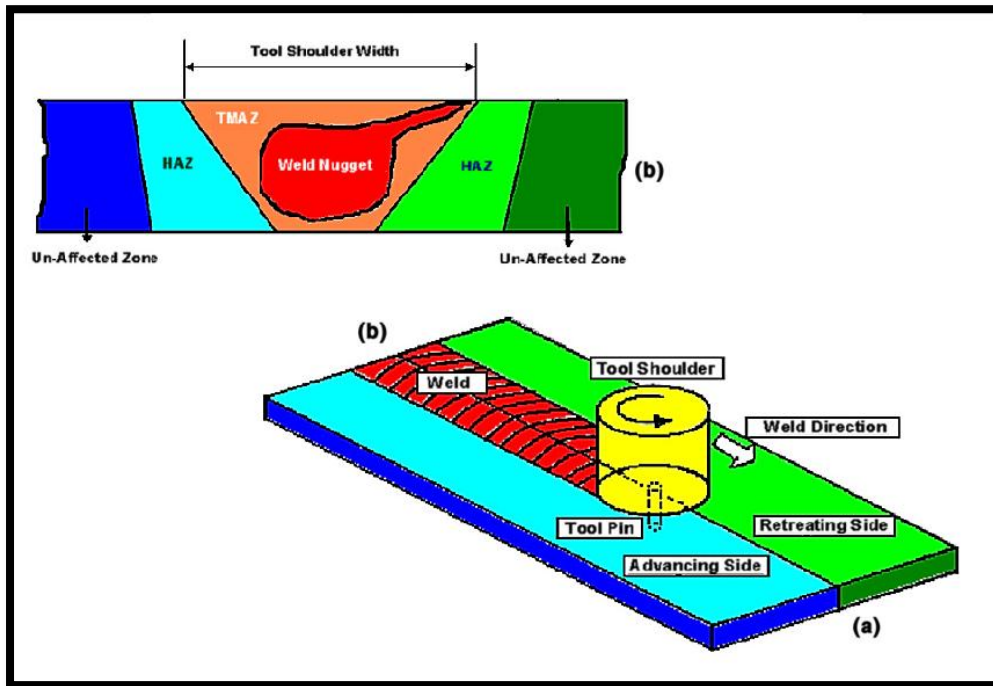


Foto makrostruktur hasil sambungan las pada spesimen diatas adalah penampang dari daerah hasil lasan yang diberi perlakuan etsa terlebih dahulu kemudian dilakukan pemotretan. Pada bagian sambungan nampak struktur *Weld Nugget* yang lebih halus dibandingkan logam induk dan terbentuknya daerah *retreating side* dan *advancing side* yang sejajar seperti yang digambarkan pada ilustrasi diatas. Untuk logam induk terlihat memiliki struktur yang lebih kasar. Adanya kerusakan di bagian tengah disebabkan oleh adanya *void* berupa *wormhole* yang bertambah luas akibat proses permesinan.



Gambar 4.14 Ilustrasi Pengambilan Foto Makrostruktur pada Hasil Sambungan Las dari bagian depan

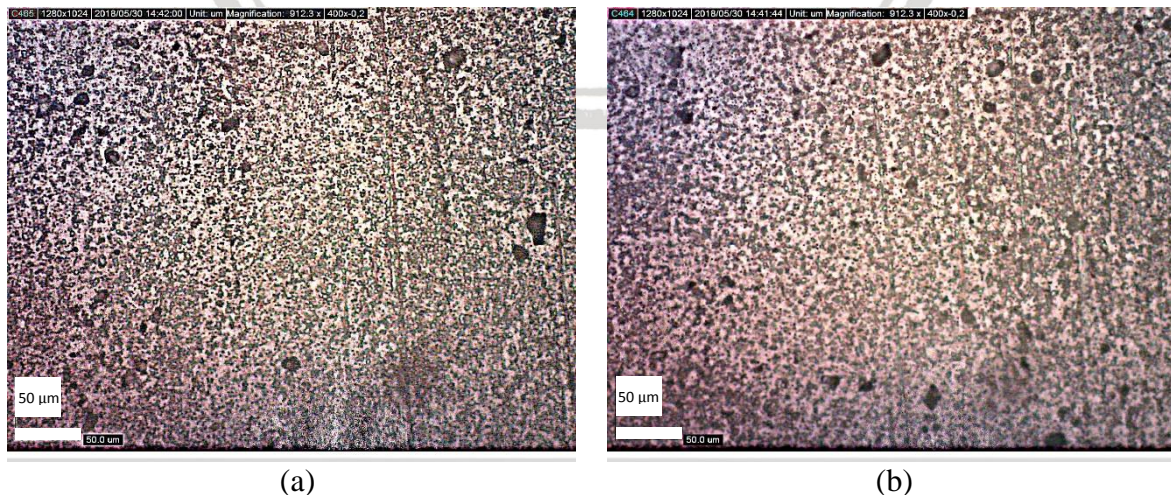
Analisis makrostruktur hasil sambungan menggunakan spesimen dengan panjang pin 3,5 mm sebagai sampel dan pengambilan foto dengan ilustrasi dari depan seperti gambar diatas. Pergerakan dari *tool* dan arah pengelasan menyebabkan terbentuknya daerah *retreating side* dan *advancing side* (bisa dilihat pada gambar 4.14) untuk daerah *weld nugget* pada gambar diatas adanya skema aliran material akibat adukan dari *tool* , mulai dari pinggir kemudian terkumpul ditengah.

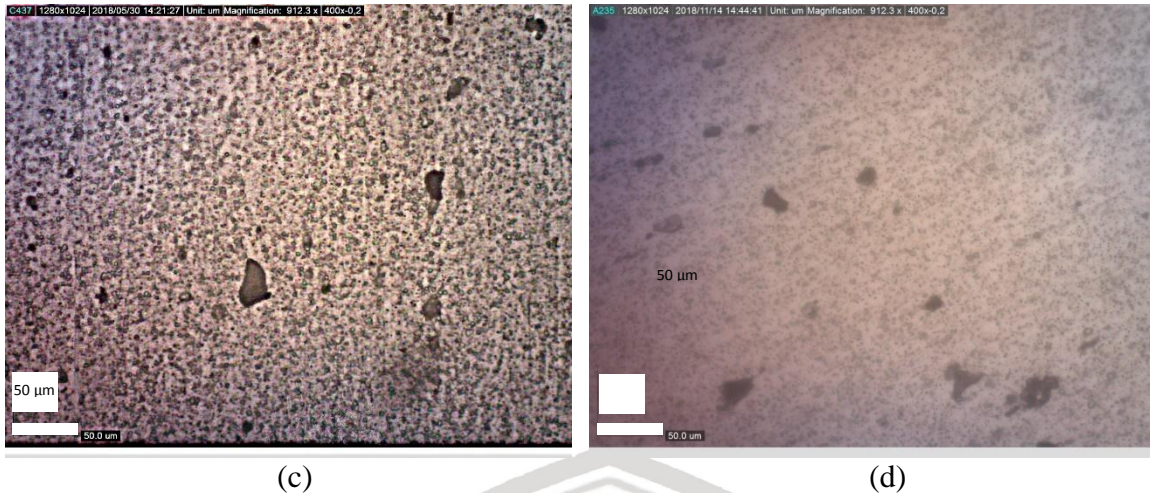


Gambar 4.15 Ilustrasi Pengambilan Foto Makrostruktur pada Hasil Sambungan Las dari bagian belakang

Analisis makrostruktur hasil sambungan menggunakan spesimen dengan panjang pin 3,5 mm sebagai sampel dan pengambilan foto dengan ilustrasi dari belakang seperti gambar diatas. Gerakan dari *tool* dan arah pengelasan menyebabkan terbentuknya daerah *retreating side* dan *advancing side* (bisa dilihat pada gambar 4.14) untuk daerah *weld nugget* pada gambar diatas adanya skema aliran material akibat adukan dari *tool* , mulai dari pinggir kemudian terkumpul ditengah.

4.2.6 Analisis Mikrostruktur Hasil Sambungan





Gambar 4.16 Mikrostruktur Hasil Sambungan Las Variasi Panjang Pin Tool 4,5 mm Pada (a) *interference zone*; (b) *weld nugget* atas (c) *weld nugget* bawah dan (d) *base metal*

Gambar 4.16 menunjukkan hasil pengujian mikrostruktur hasil sambungan pada variasi panjang pin 4,5 mm sebagai sampel. Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan perbesaran mikroskop 400X. Pengamatan dilakukan pada empat daerah yaitu daerah *weld nugget* atas, *weld nugget* bawah, daerah *interference* di tengah pelat dan logam induk (*base metal*). Kurang tepatnya perlakuan etsa pada material menyebabkan batas butiran tidak muncul dengan jelas namun dapat diperhatikan perbedaan diantara keempat gambar pada perbesaran yang sama terlihat struktur yang ditunjukkan daerah *interference zone* jauh lebih halus dibandingkan struktur permukaan di kedua daerah *weld nugget*. Hal ini disebabkan daerah *interference zone* mengalami *strain – hardening behavior* dimana terjadi deformasi plastis yang meningkat akibat proses pengulangan adukan yang akan meningkatkan tegangan *yield* yang seperti dijelaskan pada Subbab 2.9, tegangan *yield* dipengaruhi oleh ukuran butiran. Ukuran butiran yang semakin halus menandakan kekuatan dan kekerasan yang semakin tinggi, dimana membutuhkan lebih banyak gaya yang dibutuhkan untuk memindahkan *slip* diantara butiran yang kecil karena semakin banyak butiran, batas butir juga semakin meningkat sedangkan batas butir memiliki tegangan permukaan yang mampu menahan rambatan *slip*.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisa yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Arah putaran *tool* yang berguna mengaduk material, arah putaran yang berbeda dari pin akan menyebabkan butiran semakin heterogen.
2. Semakin panjang pin menghasilkan nilai kekuatan tarik material yang lebih tinggi.
3. Kekerasan tertinggi pada daerah *advancing side* dengan arah putaran *tool* yang berbeda dan panjang pin 6.5 mm
4. Patahan terjadi pada daerah *retreating side* bukan di daerah *advancing side* dikarenakan kekerasan pada daerah *advancing side* lebih tinggi dibandingkan pada daerah *retreating side*
5. Butiran pada daerah *weld nugget* lebih halus dibandingkan dengan butiran pada logam induk.

5.2 Saran

1. Diperlukannya penelitian yang lebih dalam mengenai *Double Side Friction Stir Welding* (DFSW) dikarenakan masih banyaknya faktor yang dapat mempengaruhi nilai kekuatan mekanik pada sambungan las.
2. Pada penelitian selanjutnya diharapkan dapat menambahkan alat-alat yang dapat mengukur tekanan, temperatur serta titik nol benda kerja agar penelitian kedepannya lebih akurat
3. Diharapkan nantinya menggunakan mesin yang tidak menggunakan sistem transmisi belt dan pulley agar didapatkan putaran spindel yang presisi dan putaran dengan torsi yang tinggi atau tidak terjadi slip akibat beban putar yang tinggi

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, Semari. 2012. *Teknologi Pengelasan Sesuai Perkembangan Zaman*. Surakarta : Universitas Muhammadiyah Surakarta
- American Welding Society (AWS). 2007. *Standart Methods for Mechanical Testing of Welds*. Miami: American Welding Society.
- Amat. Azwar M. 2009. *Destructive Test – Pengujian Tarik (Bab I)*. Jakarta : Universitas Indonesia.
- ASM International. 2007. *Friction Stir Welding and Processing*. Ohio : American Society of Material.
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction to Physical Metalurgy*. New York : City University of New York
- Callister, John. 2007. *Physical Metalurgy an Engineering* . New York: Mc Graw-Hill.
- Callister, William D. & Rethwisch, David G. (2007). *Fundamentals of Materials Science and Engineering An Integrated Approach Third Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Chao, Qi dan Tang. *Heat Transfer in Friction Stir Welding-Experimental and Numerical Studies*. Columbia : University of South Carolina.
- Dudzik, Krzysztof . 2004. *Properties of Advancing Side of Weld in Joint Welded by Friction Stir Welding*. Poland: Gdynia Maritime University.
- Givi, M.K.B dan Asadi, Parviz. 2014. *Advances in Friction Stir Welding and Processing*. London : Woodhead Publishing.
- Guerra, M.J.C. 2001. *Friction Stir Welding and Processing*. USA : Warrendale Publishing. *Introduction to Welding Technology*. Welding Science and Technology. Jordan : The Hashemite University.
- Kumar, Nilesh. 2012. *Review Double Sided Friction Stir Welding and Single Side of Alloy Materials*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Lohwasser, D. dan Chen, Zhan. 2009. *Friction Stir Welding from basic to applications*. Germany : AIRBUS.
- McPherson. 2012. *Principles and Thermo-Mechanical Model of Friction Stir Welding*. Usa : New Jersey
- Mehra, Jata Manohey. 2012. *Mechanical Properties of Material in Friction stir welding*. : New Jersey : Modern Welding Technology

- Minnick, Mc 2017. *Archive Friction stir welding of Sciences*. Berlin : Springer Berlin Heidelberg
- Mishra, R.S. 2005. *Friction stir welding and processing*. China : University of Missouri-Rolla.
- Mishra, R.S. 2007. *Friction stir welding and mechanical properties*. China : University of Missouri-Rolla.
- Muthu, M.F.X, dan Jayabalan, V. 2014. *Tool Travel speed effects on microstructure of friction stir welded aluminium-copper joints*. India: Elsevier.
- Rajakumar, 2012. *Proceeding of Third International Symposium on Friction Stir Welding* Indian: Institute of Technology.
- Roylance, Davis. (2008). *Mechanical Properties of Materials*. Massachussets: MIT
- Sahu, Kumar S., Pal, Kamal., dan Routara, B.C. 2015. Effect of pin geometry on friction stir Cuto Al Alloy lap Joint. India: Elsevier.
- Saviro, Alim. 2015. Pengaruh Sudut Arah Pengelasan Dan Kecepatan *Spindle* Pada Sambungan Lasan Aluminium Murni Terhadap Kekuatan Tarik Pada Hasil Pengelasan *Friction Stir Welding*. Malang : Universitas Brawijaya.
- Suardi, S. 2011. *Pengembangan Friction Stir Welding pada Material AC4CH*. Depok: Universitas Indonesia.
- Surdia, Tata dan Saito, Shinroku. 1999. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta : Pradnya Paramita.
- Terry. 2005. *Friction Stir Welding*. Cambridge : University of Cambridge
- Vashista ,M and Avinash Ravi Raja 2016. *Characterization of Advancing and Retreating weld of Friction stir welding of aluminium*. Indian: Institute of Technology
- Wiryosumarto, Harsono dan Okumura, Toshie. 1994. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta : Pradnya Paramita.