



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN SISTEM *FRICITION STIR WELDING* (FSW) PADA
MATERIAL AC4CH**

SKRIPSI

**SAMSI SUARDI
0806368875**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN SISTEM *FRICITION STIR WELDING* (FSW) PADA
MATERIAL AC4CH**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**SAMSI SUARDI
0806368875**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JULI 2011**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

PENGEMBANGAN SISTEM *FRICTION STIR WELDING* (FSW) PADA MATERIAL AC4CH

yang dibuat untuk melengkapi sebagai persyaratan menjadi sarjana teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah di publikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Skripsi ini merupakan bagian yang dikerjakan bersama saudara Muhamad Reza Dirhamsyah (0806368761) dengan judul **PENGARUH PERUBAHAN PARAMETER PEMESINAN TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL AC4CH PADA PROSES *FRICTION STIR WELDING* (FSW)**. Sehingga harap maklum jika ada beberapa bagian dari buku ini ada kesamaan dengan skripsi tersebut.

Nama : Samsi Suardi

NPM : 0806368875

Tanda Tangan :



Tanggal : 17 juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Samsi Suardi
NPM : 0806368875
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : PENGEMBANGAN PROSES *FRICITION STIR WELDING*
(FSW) PADA MATERIAL AC4CH

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ario Sunar Baskoro, ST, MT, M.Eng (.....)

Penguji : Dr. Ir. Gandjar Kiswanto, M.Eng (.....)

Penguji : Dr. Ir. Gatot Prayogo, M.Eng (.....)

Penguji : Ir. Henky Suskito Nugroho, MT (.....)

Penguji : Ir. Winarto, MSc.PhD (.....)

Ditetapkan di : Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 17 Juni 2011

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa dalam proses pembuatan hingga selesainya skripsi ini banyak pihak yang telah membantu dan menyemangati saya dalam pembuatan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada :

- 1) Orang tua dan seluruh keluarga tercinta yang selalu memberikan bantuan baik moril maupun materiil.
- 2) Dr. Ario Sunar Baskoro, ST, MT, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
- 3) Rahmahyanti dan Aqila Artha Ibrahim yang selalu memberikan perhatian dan motivasi.
- 4) Muhamad Reza Dirhamsyah yang telah bekerja sama dengan baik selama pengerjaan skripsi ini.
- 5) Bapak Ardiyansyah, ST, MS-Eng sebagai pembimbing akademik yang telah mengarahkan dan membimbing selama masa kuliah.
- 6) Rekan-rekan kerja PT. AHM dan rekan-rekan PPSE 2008 yang membuat hari-hari selalu berwarna.
- 7) Saudara Iwan “workshop” dan Dilla “diametral” yang juga ikut ambil membantu saya menyelesaikan skripsi ini.
- 8) Teman-teman teknik mesin seperjuangan yang telah ikut berkontribusi dalam pembuatan skripsi ini.

Depok, 17 Juni 2011

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Samsi Suardi
NPM : 0806368622
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah yang berjudul :

PENGEMBANGAN SISTEM *FRICITION STIR WELDING* (FSW) PADA MATERIAL AC4CH

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pengkayaan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian Pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 17 Juni 2011

Yang menyatakan,



(Samsi Suardi)

ABSTRAK

Nama : Samsi Suardi
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Pengembangan Sistem *Friction Stir Welding* (FSW)
Pada Material AC4CH

Teknik pengelasan banyak diaplikasikan dalam proses penyambungan karena karakteristiknya yang lebih ringan dan prosesnya yang relatif sederhana, sehingga biaya yang diperlukan jadi relatif murah. *Friction stir welding* (FSW) merupakan metode pengelasan yang diciptakan dan dikembangkan oleh The Welding Institute (TWI) pada tahun 1991. Prinsip Kerja dari FSW adalah memanfaatkan gesekan dari *tool* yang berputar dan bergerak pada alur pengelasan dengan benda kerja yang diam. Parameter pengelasan meliputi kecepatan putar, kemiringan *tool*, kecepatan tempuh, penetrasi *shoulder*, penetrasi *probe*, bentuk dan dimensi *probe*, bentuk dan dimensi *shoulder*, material *tool*, dll. Parameter-parameter pengelasan biasanya dipublikasi untuk lingkungan yang terbatas dan sedikit dipublikasikan untuk umum. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan proses FSW pada material AC4CH dimana pengembangan difokuskan pada *design tool*, pemilihan mesin, persiapan material uji, perubahan parameter kecepatan putar, kemiringan *tool* dan bentuk dari *probe tool* serta sejauh mana korelasi antara parameter tersebut dengan visual hasil pengelasan (*flashing* dan kekasaran permukaan sambungan). Dari penelitian ini bahwa pengembangan metode *friction stir welding* (FSW) untuk material AC4CH dapat menggunakan mesin milling universal Dahlih DL-GH950 dengan material *tool* SLD8 (58-63 HRC). Variasi parameter kecepatan putar, kemiringan *tool* dan bentuk dari *probe* mempunyai *mean* yang merata atau dengan kata lain variasi dari parameter tersebut tidak berpotensi merubah *flashing* dan kekasaran dari permukaan pengelasan.

Kata kunci : friction stir welding, parameter pengelasan, kecepatan putar, kecepatan tempuh, kemiringan *tool*, AC4CH.

ABSTRACT

Name : Samsi Suardi
Programme : Mechanical Engineering
Topic : Development of Friction Stir Welding (FSW) system for AC4CH material

Welding technique has widely applied in the process of joining because the process is relatively simple, so that the cost can be inexpensive. Friction stir welding (FSW) is a welding method that was created and developed by The Welding Institute (TWI) in 1991 which at the beginning of his research was applied to the aluminium. The principle of FSW is to use the friction of the rotating tool and moving the groove welding with a fixed workpiece. The welding parameters include the rotational speed, tool attitude (tool tilt), the travel speed, shoulder plunge, probe penetration, shape and dimensions of the probe, shape and dimensions of shoulder, tool material, etc. Welding parameters are usually published for a limited environment and rarely published for the public. Therefore, the purpose of this research is to develop the process FSW for material AC4CH in which development is focused on changing the rotational speed parameter, tilt of the tool and shape of the probe and the extent of the correlation between these parameters with the visual results of welding (flashing and surface roughness of weld joint). In this study that the development methods of friction stir welding (FSW) for the material AC4CH used a universal milling machine DL-GH950 Dahlih with SLD8 tool material (58-63 HRC). Parameter variation such as rotational speed, tilt of the tool and shape of the probe has a uniform mean or in other words, the variation of these parameters did not substantially change the flashing and the roughness weld joint surface of the welding.

Keywords : Friction stir welding, weld parameter, rotational speed, travel speed, tool attitude (tool tilt), AC4CH.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1. LATAR BELAKANG.....	1
1.2. PERUMUSAN MASALAH.....	2
1.3. TUJUAN PENELITIAN.....	3
1.4. PEMBATALAN MASALAH.....	3
1.5. METODOLOGI PENELITIAN.....	3
1.6. SISTEMATIKA PENULISAN.....	5
BAB 2 FRICTION STIR WELDING.....	2
2.1. TEKNOLOGI FRICTION STIR WELDING (FSW).....	7
2.2. GAYA PADA FRICTION STIR WELDING.....	9
2.3. DESKRIPSI PROSES FSW.....	9
2.3.1. SAMBUNGAN BUTT.....	9
2.3.2. SAMBUNGAN TUMPUK.....	12
2.4. KETETAPAN DAN TERMINOLOGI FSW	15
2.5. PROFIL SAMBUNGAN DAN ZONA PENGELASAN.....	15
2.6. VARIABLE PROSES	16
2.6.1. PARAMETER PENGELASAN.....	17
2.6.2. PERANCANGAN TOOL.....	17
2.7. UJI MEKANIK FSW.....	19
2.8. MATERIAL ALUMINIUM	19
2.9. UJI TABEL KONTINGENSI	24
BAB 3 PENGEMBANGAN PROSES FSW.....	25
3.1. DIAGRAM ALIR PENELITIAN.....	25
3.2. ALAT DAN MATERIAL PENGUJIAN	26
3.2.1. BENDA UJI PENGELASAN.....	26
3.2.2. TOOL PENGELASAN.....	35
3.2.3. MESIN MILLING DAN AKSESORIS	45
3.3. PERSIAPAN PROSES PENGELASAN	48
3.4. PROSES PENGELASAN.....	50

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA.....	56
4.1. KARAKTERISASI HASIL PENGUJIAN FSW	56
4.2. HASIL PENGUJIAN FSW	57
4.3. ANALISIS VARIANS (ANOVA)	60
4.3.1. ANALISIS VARIANS BENTUK PROBE TERHADAP FLASHING PENGELASAN.....	61
4.2.2. ANALISIS VARIANS KEMIRINGAN TOOL TERHADAP FLASHING PENGELASAN	63
4.2.3. ANALISIS VARIANS KECEPATAN PUTAR TERHADAP FLASHING PENGELASAN	65
 BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT....	 68
5.1. KESIMPULAN	68
5.2. SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT.....	68
 DAFTAR PUSTAKA.....	 69

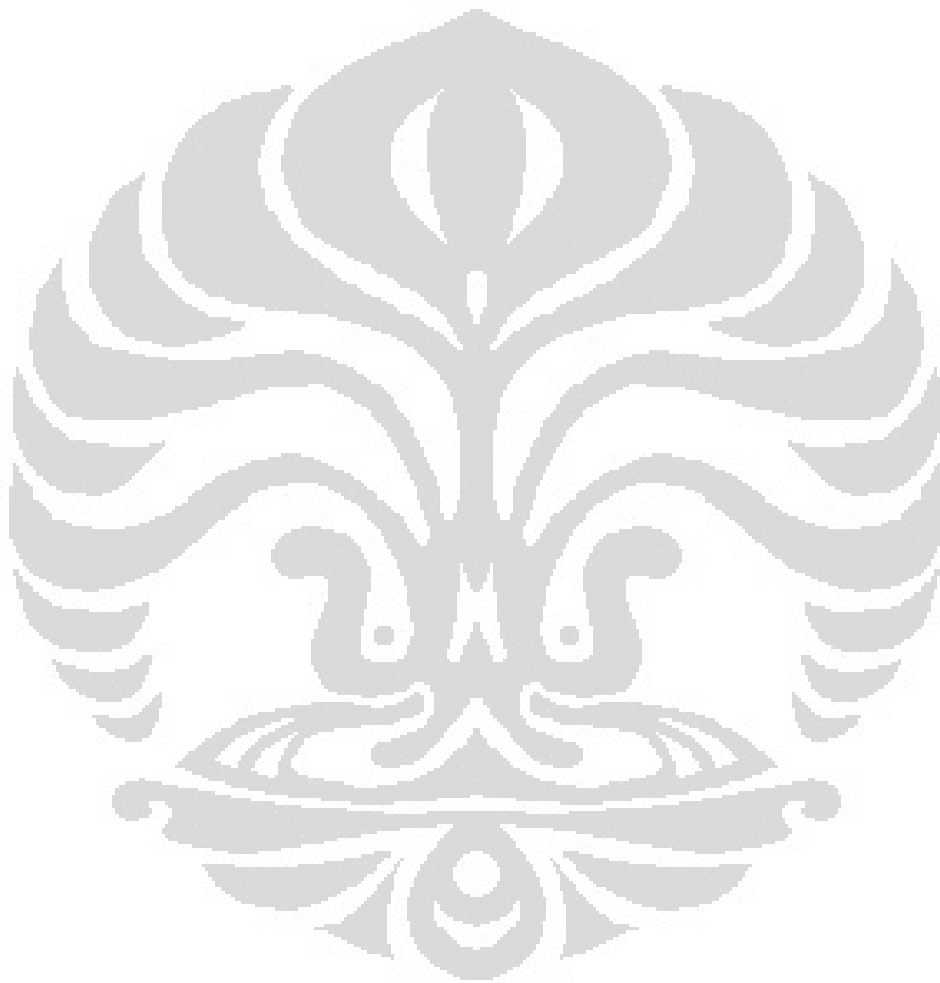


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Prinsip dasar proses friction stir welding	6
Gambar 2.2.	Konfigurasi sambungan friction stir welding.....	8
Gambar 2.3.	Gaya-gaya pada friction stir welding.....	9
Gambar 2.4.	Deskripsi proses sambungan butt	10
Gambar 2.5.	Variasi kekerasan pada sambungan butt	11
Gambar 2.6.	Tool untuk sambungan tumpuk	12
Gambar 2.7.	Terminologi FSW	14
Gambar 2.8.	Kedalaman shoulder (shoulder plunge)	14
Gambar 2.9.	Face, toe dan root pada FSW	15
Gambar 2.10.	Arah uji tarik berdasarkan orientasi pengelasan.....	15
Gambar 2.11.	Profil sambungan butt	16
Gambar 2.12.	Konfigurasi shoulder dan pin	18
Gambar 2.13.	Alumunium casting dan tempa.....	20
Gambar 2.14.	Metode pembentukan alumunium	21
Gambar 3.1.	Diagram alir percobaan FSW pada material AC4CH	25
Gambar 3.2.	Mesin, tool dan perlengkapan percobaan FSW.....	26
Gambar 3.3.	Raw material AC4CH (ingot)	28
Gambar 3.4.	Potongan besar ingot (300x90x80)	28
Gambar 3.5.	Benda uji ukuran 90x80x8	29
Gambar 3.6.	Benda uji yang telah dilas.....	29
Gambar 3.7.	Standar benda uji no.5	31
Gambar 3.8.	Standar benda uji no.13.....	31
Gambar 3.9.	Benda uji no.5	32
Gambar 3.10.	Benda uji no.13.....	32
Gambar 3.11.	Gambar 2D benda uji no.13.....	33

Gambar 3.12.	Ilustrasi benda uji setelah permesinan lanjut	33
Gambar 3.13.	Gambar 2D tool FSW d7.8.....	40
Gambar 3.14.	Tool terpasang pada collet mesin milling	41
Gambar 3.15.	FSW dengan tool probe $\varnothing 7.87$ mm dan shoulder $\varnothing 25.4$ mm	41
Gambar 3.16.	Tool terpasang pada collet mesin milling	41
Gambar 3.17.	Gambar 2D tool FSW dengan cyl. probe $\varnothing 5$	42
Gambar 3.18.	Tool FSW dengan cyl. probe $\varnothing 5$	42
Gambar 3.19.	Gambar 2D tool FSW dengan taper probe $\varnothing 5$	43
Gambar 3.20.	Tool FSW dengan taper probe $\varnothing 5$	43
Gambar 3.21.	Gambar 2D tool FSW dengan ballnose probe $\varnothing 5$	44
Gambar 3.22.	Tool FSW dengan ballnose probe $\varnothing 5$	44
Gambar 3.23.	Hasil pengelasan dengan tool FSW probe $\varnothing 5$	45
Gambar 3.24.	Mesin dahlih DH-GL950	46
Gambar 3.25.	Ragum meja rata	47
Gambar 3.26.	Aplikasi backplate pada FSW.....	48
Gambar 3.27.	Penyettingan ragum dengan dial indicator.....	49
Gambar 3.28.	Handle penyetingan kecepatan putar.....	49
Gambar 3.29.	Penyetingan kemiringan sudut benda kerja.....	50
Gambar 3.30.	Pemasangan tool pada collet	50
Gambar 3.31.	Handle pengatur kecepatan putar pada mesin Dahlih.....	51
Gambar 3.32.	Pencekaman benda kerja dengan ragum.....	51
Gambar 3.33.	Positionong tool terhadap benda kerja.....	52
Gambar 3.34.	Handle pengunci meja kerja pada sumbu X dan Y.....	52
Gambar 3.35.	Penetrasi tool pada benda kerja.....	53
Gambar 3.36.	Shoulder tool menyentuh benda kerja.....	53
Gambar 3.37.	Posisi kunci spindle sumbu Z.....	54
Gambar 3.38.	Proses FSW dengan travel speed konstan	54

Gambar 3.39.	Tool FSW keluar dan menjauh (home position).....	55
Gambar 3.40.	Marking dan foto hasil pengelasan.....	55
Gambar 3.41.	Ilustrasi permukaan pengelasan kasar.....	56
Gambar 3.42.	Ilustrasi permukaan pengelasan halus.....	56
Gambar 3.43.	Ilustrasi pengukuran flashing.....	56
Gambar 3.44.	Grafik mean parameter pengelasan.....	67



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Pembagian material berdasarkan komposisi kimia	23
Tabel 2.2.	Pembagian material berdasarkan mechanical properties	24
Tabel 3.1.	Mekanikal, elektrikal, Thermal, processing dan Componen Elemen properties AC4CH	28
Tabel 3.2.	Pemilihan material untuk tool FSW	35
Tabel 3.3.	Pemilihan material tool steel untuk tool FSW	35
Tabel 3.4.	Komparasi karakteristik material tool steel (YSS)	37
Tabel 3.5.	Dimensi tool FSW	39
Tabel 4.1.	Tabel hasil pengujian FSW.....	59
Tabel 4.2.	Tabel matrik hasil pengujian FSW	60
Tabel 4.3.	Tabel varians bentuk probe terhadap flashing pengelasan	61
Tabel 4.4.	Tabel varians kemiringan tool terhadap flashing pengelasan ..	63
Tabel 4.5.	Tabel varians kecepatan putar terhadap flashing pengelasan ...	65

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Industri manufaktur di era sekarang dihadapkan pada tuntutan yang cukup berat. Peningkatan akan kualitas dan kuantitas serta persaingan industri yang ketat menuntut kebutuhan akan teknik baru yang bisa mengakomodir semua tuntutan. Teknik pengelasan banyak diaplikasikan dalam proses penyambungan karena karakteristiknya yang lebih ringan dan prosesnya yang relatif sederhana, sehingga biaya yang diperlukan relatif lebih murah.

Aluminium merupakan penghantar panas yang baik serta mempunyai titik lebur (melting point) yang rendah, sehingga sangat sulit untuk memanaskan atau mencairkan hanya sebagian dari aluminium tersebut. Oleh karena itu sifat mampu las aluminium dinilai kurang baik jika dibandingkan dengan baja. Salah satu teknik untuk mengatasi permasalahan ini adalah metode *friction stir welding* (FSW).

FSW merupakan metode pengelasan yang diciptakan dan dikembangkan oleh The Welding Institute (TWI) pada tahun 1991 yang pada awal penelitiannya diaplikasikan untuk material aluminium paduan [1,2]. Prinsip kerja dari FSW adalah memanfaatkan gesekan dari tool yang berputar dan bergerak pada alur pengelasan dengan benda kerja yang diam. Sampai saat ini penelitian tentang FSW masih dikembangkan, seperti penelitian pada variasi perancangan tool, parameter pengelasan, material tool dll.

Metode FSW menghasilkan daerah *Thermomechanic Affected Zone* (TMAZ) yang lebih kecil dibandingkan dengan pengelasan busur nyala (*fusion welding*). Metode pengelasan ini pun bisa menekan biaya proses menjadi lebih murah karena hanya memerlukan input energi yang rendah, selain itu potensi kegagalan akibat bahan tambah pun bisa direduksi karena metode ini tidak memerlukan bahan tambah. Hasil pengelasan memiliki permukaan yang relatif rata, halus, kuat dan tidak berpori dibanding hasil pengelasan tradisional. Metode inipun ramah lingkungan karena tidak ada uap, percikan dan tidak ada silau saat proses berlangsung [3].

Temperatur kerja yang tidak terlalu tinggi mengakibatkan tegangan sisa yang terbentuk dan distorsi akibat panas juga rendah. Metode ini dapat digunakan juga untuk aluminium paduan yang tidak dapat disambung dengan las cair [4].

Parameter pengelasan dari FSW meliputi kecepatan putar (*rotational speed*), kecepatan tempuh (*travel speed*), kemiringan tool (*tool tilt*), kedalaman *shoulder* (*shoulder plunge*), kedalaman penetrasi *probe* dll. Parameter pengelasan biasanya dipublikasi di lingkungan yang terbatas, sehingga sedikit sekali yang dipublikasi untuk umum. Walaupun dipublikasikan biasanya ada beberapa parameter yang tidak dipublikasikan, hanya sedikit yang disebutkan seperti parameter penetrasi *probe*, kedalaman *shoulder*, atau kemiringan. Parameter yang biasanya tidak dipublikasikan adalah kecepatan putar dan kecepatan tempuh.

Karena terbatasnya publikasi parameter yang ada maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sejauh mana parameter-parameter ini berpengaruh dalam proses FSW. Parameter yang akan diteliti adalah parameter kecepatan putar, kemiringan tool, dan bentuk probe dari tool.

Dengan adanya variasi parameter dari tool maka diharapkan bisa mengetahui pengaruh-pengaruh yang ditimbulkan dari perbedaan tiap parameter.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Perubahan berbagai parameter pada proses FSW akan menghasilkan kualitas sambungan hasil pengelasan yang bervariasi. Komposisi dari variasi parameter berpotensi besar akan menghasilkan kualitas sambungan dan *joint profil* yang berbeda-beda sehingga peneliti akan mempelajari trend yang terjadi dengan adanya perubahan parameter, mengingat nilai dari parameter yang sudah ada tidak banyak yang dipublikasi untuk umum dan sangat spesifik untuk aplikasi material tertentu. Oleh karena itu penelitian ini akan dilakukan untuk mengamati perubahan parameter dan visual hasil sambungannya. Dengan banyaknya variasi parameter diharapkan dapat diketahui parameter yang optimal untuk pengelasan FSW dengan material benda kerja Aluminium AC4CH.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan proses FSW pada material Aluminium AC4H dimana pengembangan difokuskan pada perubahan parameter kecepatan putar, kemiringan *tool* dan bentuk dari *probe tool* serta sejauh mana korelasi antara parameter tersebut dengan visual hasil pengelasan (*flashing* dan kekasaran permukaan sambungan).

1.4 PEMBATASAN MASALAH

Hal yang akan dibahas dalam laporan tugas akhir ini adalah pengaruh perubahan parameter pengelasan terhadap kualitas sambungan FSW, dengan asumsi dan batasan sebagai berikut :

1. Material *tool* yang digunakan adalah SLD8 dengan proses *heat treatment hardening* 58-63 HRC, diameter *shoulder* 12 mm, diameter *probe* 5 mm dan panjang *probe* 5 mm.
2. Material benda kerja yang digunakan adalah AC4CH dengan ketebalan 8mm dan 4mm untuk benda uji.
3. Metode pengelasan FSW dengan menggunakan mesin milling universal Dahlih tipe DL-GH950.
4. Kecepatan tempuh (*travel speed*) konstan 11.5 mm/menit.
5. Tipe sambungan las *butt joint*.
6. Pencekaman benda kerja menggunakan ragum meja rata.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur
Merupakan pengumpulan data-data, teori atau informasi yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku-buku, jurnal yang berasal dari dosen maupun perpustakaan.
2. Persiapan material benda kerja AC4H
Persiapan ini meliputi penggambaran 2D, pemotongan kasar benda kerja pada mesin gergaji, proses milling benda kerja, pemotongan

material dengan tebal 8 mm dan pembentukan benda uji sesuai dengan standard material JIS.

3. Perancangan dan pembuatan tool

Perancangan dan pembuatan tool meliputi pemilihan bentuk *probe*, *shoulder*, pemilihan material, penggambaran 3D dan 2D, proses pemotongan *raw material*, proses permesinan (bubut dan milling), *Heat treatment (hardening 58-63 HRC)*, dan gerinda.

4. Persiapan peralatan pengelasan

Langkah ini meliputi persiapan mesin milling, pemasangan ragum pengecam, penyettingan ragum, persiapan *backplate/parallel pad*, kunci-kunci pendukung dan lain lain.

5. Proses pengelasan

Langkah ini meliputi percobaan awal (*trial*) pengelasan untuk menentukan parameter optimal pengelasan. Parameter optimal harus dicari karena kondisi aktual mesin yang digunakan kondisinya tidak prima 100%. Setelah parameter optimal mesin diketahui maka proses pengelasan dengan variasi parameter dapat dilakukan.

6. Analisis hasil pengelasan

Analisis pengelasan difokuskan pada visual hasil pengelasan terhadap parameter kecepatan putar, kemiringan benda kerja dan bentuk dari *probe tool*.

7. Pembahasan

Data yang didapat diolah untuk mencari korelasi perubahan visual hasil pengelasan terhadap variasi parameter.

8. Kesimpulan

Kesimpulan dapat diambil setelah data hasil pengolahan terhadap proses pengujian selesai.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan laporan tugas akhir ini dibagi menjadi beberapa bab agar maksud dan tujuan yang ingin disampaikan oleh penulis dapat tercapai dengan baik.

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang yang melandasi penulisan skripsi, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB 2 DASAR TEORI FRICTION STIR WELDING

Bab ini berisi tentang teori-teori yang mendasari penelitian ini. Dasar teori ini meliputi dasar teori *Friction Stir Welding*, *Tool design*, material dan tes uji. Dasar teori yang ada dikutip dari beberapa buku dan referensi lain yang mendukung dalam penulisan ini.

BAB 3 PENGEMBANGAN PROSES FSW

Bab ini menjelaskan tentang alat pengujian yang digunakan, metode persiapan, metode pengambilan data dan metode pengujian yang dilakukan.

BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

Bagian ini berisikan data-data dan analisis dari hasil yang diperoleh dari proses pengambilan data dan pengujian.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

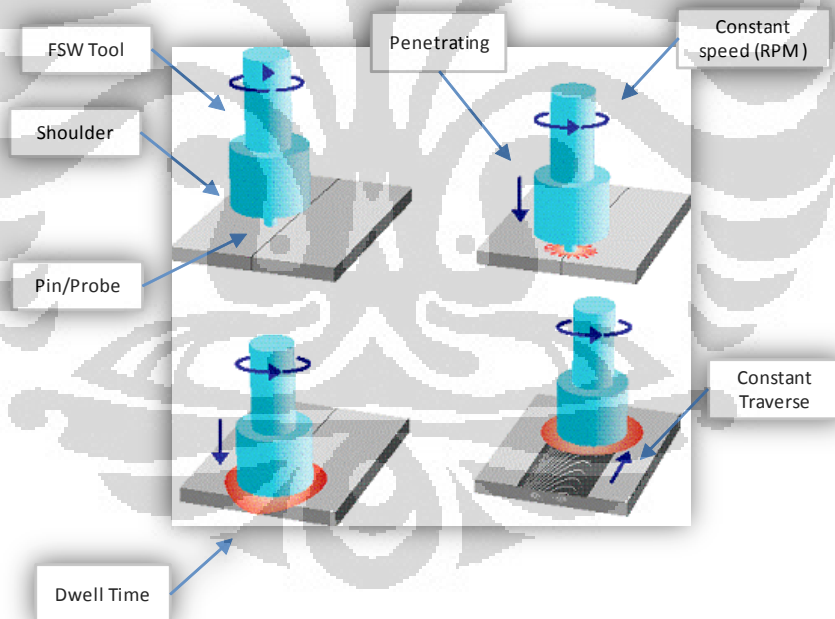
Pada bab ini berisi kesimpulan dari hasil data dan analisis percobaan dan saran yang diberikan untuk perbaikan pada percobaan selanjutnya.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 TEKNOLOGI FRICTION STIR WELDING (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) merupakan salah satu teknik pengelasan baru yang diciptakan oleh The Welding Institute (TWI), Cambridge, Inggris [1,2]. FSW termasuk *unconsumable solid-state joining proces* yang berarti pengelasan tanpa bahan tambah dan suhu kerjanya tidak melewati titik lebur benda kerja dan digunakan untuk aplikasi dimana kebutuhan akan perubahan karakteristik dasar dari benda kerja bisa diminimalisir sekecil mungkin.



Gambar 2.1. Prinsip dasar proses friction stir welding [5]

Dalam FSW, tool pengelasan dengan atau tanpa *profil* pada *probe* berputar dan bergerak dengan kecepatan konstan sepanjang jalur sambungan antara dua

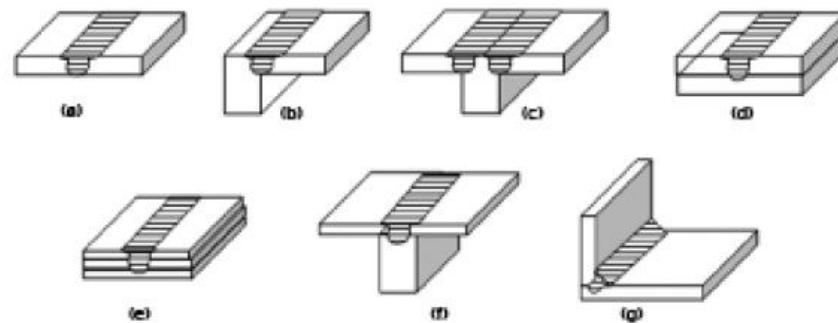
material yang dilas. Benda kerja harus dicekam dengan kuat pada *fixture* atau ragam untuk mempertahankan posisinya akibat gaya yang terjadi pada waktu pengelasan. Panjang dari *probe* harus lebih pendek daripada tebal benda kerja dan *shoulder* dari *tool* harus bersentuhan dengan permukaan benda kerja [4].

Gesekan panas (*Frictional Heat*) pada FSW dihasilkan oleh gesekan antara *probe* dan *shoulder* dari *welding tool* dengan material benda kerja. Panas ini bersama dengan panas yang dihasilkan dari proses pengadukan mekanik (*mechanical mixing*) akan menyebabkan material yang diaduk akan melunak tanpa melewati titik leburnya (*melting point*), hal ini lah yang memungkinkan *tool* pengelasan bisa bergerak sepanjang jalur pengelasan. Ketika pin *welding tool* bergerak sepanjang jalur pengelasan, permukaan depan pin akan memberikan gaya dorong plastis terhadap material ke arah belakang pin sambil memberikan gaya tempa yang kuat untuk mengkonsolidasikan logam las [4].

Keuntungan-keuntungan dari FSW :

- Tidak terjadi pelelehan selama pengelasan
- Bisa mengelas semua jenis Aluminum alloys
- Kekuatan las lebih baik dibandingkan dengan *fusion welding*
- Distorsi lebih rendah dari pada fusion welding
- Tidak memerlukan bahan pengisi
- Tidak memerlukan gas pelindung
- Tool welding dapat digunakan berulang ulang
- Ramah lingkungan (*low fume*)
- Energi yang dibutuhkan untuk pengelasan lebih rendah dari *fusion welding*

FSW bisa digunakan untuk mengelas material aluminum (*casting* maupun *alloy*) baik satu atau berbeda series, baja, titanium, tembaga, magnesium *alloy*, logam paduan dan komposit matrik logam [4]. FSW dapat digunakan untuk menghasilkan sambungan butt, sudut, bertumpuk (*lap*), T, *spot*, dan *fillet* serta dapat digunakan pula untuk menyambung benda berongga, seperti tanki, tabung dan pipa dengan kontur 3 dimensi. Selain untuk membuat sambungan, FSW juga cocok digunakan untuk memperbaiki sambungan yang ada.



Gambar 2.2. Konfigurasi sambungan FSW. a. *Square Butt*, b. *Edge Butt*, c. *T-butt joint*, d. *Lap joint*, e. *Multiple lap joint*, f. *T-lap joint*, g. *Fillet joint* [6]

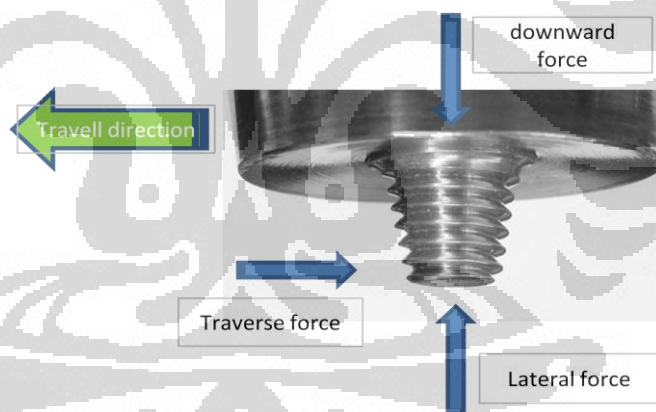
Dunia industri dan penelitian, mayoritas fokus dalam mengembangkan pengelasan butt untuk aluminium alloy lembaran dan pelat sampai tebal 3 inch [4]. FSW juga digunakan untuk membuat sambungan butt antar logam dengan ketebalan yang berbeda. FSW dapat dilakukan di semua posisi (horizontal, vertikal, overhead dan orbital) [4]. FSW dapat berproduksi di industri otomotif secara umum dan industri pesawat terbang secara khususnya.

Pengembangan FSW pada industri otomotif dan pesawat terbang sangat pesat karena dapat mereduksi berat total dari konstruksi. Pengurangan berat bisa berasal dari jumlah total pengencang (*fastener*) yang dihilangkan. Selain itu banyak biaya yang dapat dihemat yang berasal dari pengurangan biaya design, manufaktur, perakitan dan waktu pemeliharaan, biaya-biaya tersebut bisa ditekan akibat berkurangnya jumlah part pada konstruksi. Sambungan FSW mempunyai efek konsentrasi stress yang lebih rendah di area sambungan dibandingkan dengan aplikasi *fastener* dan dapat memperbaiki sifat korosif dengan mengurangi *fastener* yang merupakan sumber utama dari kontak metal berbeda jenis. Dan penghematan terakhir berasal dari hilangnya biaya untuk keperluan *sealant*, *locking compound* dan sejenisnya.

2.2 GAYA PADA FRICTION STIR WELDING

Gaya yang terjadi pada tool FSW adalah :

- *Downward force*, merupakan gaya utama yang dipakai untuk mempertahankan posisi tool pada atau dibawah permukaan material benda kerja.
- *Traverse force*, gaya yang sejajar dengan arah pergerakan tool. Peningkatan gaya transversal merupakan wujud resistansi material terhadap pergerakan tool, dan sejalan nya proses gaya ini akan berkurang sejalan dengan naiknya temperatur kerja.
- *Lateral force*, adalah gaya yang tegak lurus dengan arah dari pergerakan tool dan merupakan reaksi gaya dari *downward force*.
- *Torsi* dibutuhkan untuk memutarakan tool, besarnya tergantung dari *downward force* dan nilai koefisien gesek atau *flow strength* dari material.



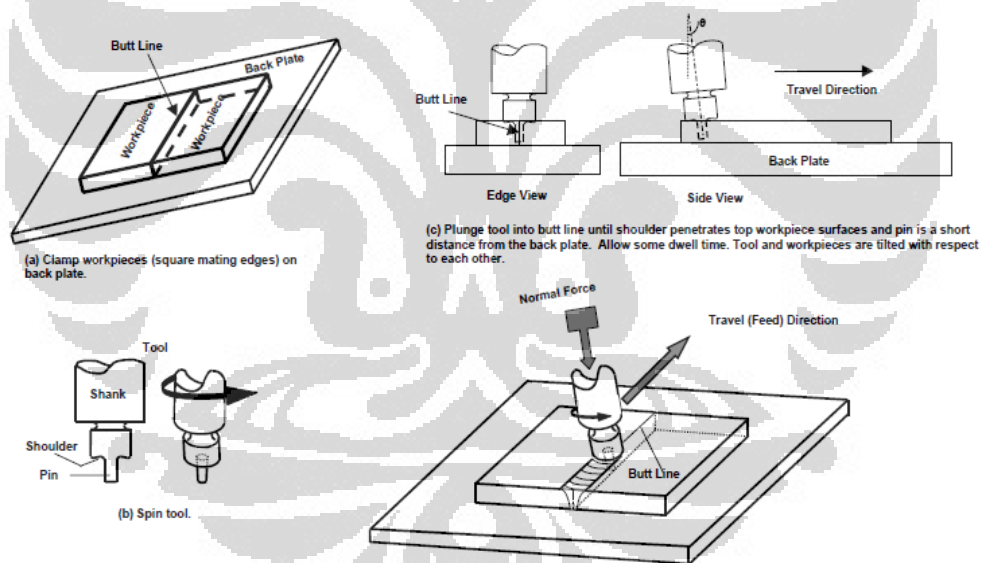
Gambar 2.3. Gaya-gaya pada friction stir welding

2.3 DESKRIPSI PROSES FSW

Pada proses FSW berbagai jenis sambungan bisa dibuat, seperti *Butt Joint*, *Lap Joint* dan sambungan lainnya.

2.3.1 Sambungan Butt (*Butt Joint*)

Dua benda kerja yang dilas pada posisi pertemuan ruas antara bidang yang bersentuhan, di cekam rigid pada *fixture* atau ragum. *Fixture* mencegah benda kerja berputar dan atau terangkat ketika proses las berlangsung [4]. *Tool* pengelasan yang terdiri dari *shank*, *sholder* dan *probe* berputar dengan kecepatan dan kemiringan yang telah ditentukan. *Tool* secara perlahan turun dan masuk ke dalam ruas pertemuan benda kerja sampai *shoulder* dari *tool* menyentuh permukaan benda kerja dan ujung pin sedekat mungkin dengan *backplate*. *Dwell time* yang singkat dapat membangkitkan panas untuk *preheating* dan pelunakan material sepanjang garis sambungan. Sampai di akhir pengelasan *tool* ditarik/diangkat ketika *tool* masih dalam kondisi berputar. Seperti pin yang ditarik, *tool* akan meninggalkan lubang (*keyhole*) di ujung pengelasan. *Tool shoulder* yang bersentuhan dengan benda kerja pun meninggalkan bekas *semi circular ripple* di jalur pengelasan seperti pada ilustrasi di bawah.

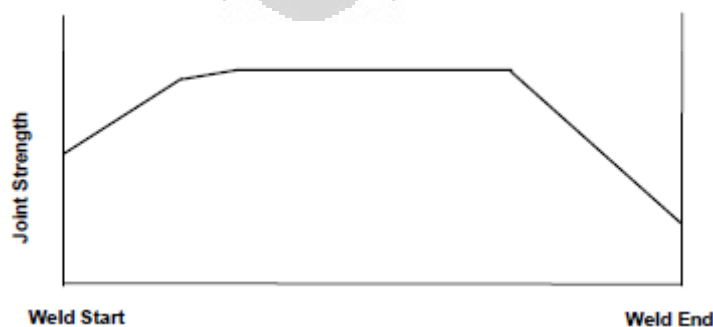


Gambar 2.4. Deskripsi proses FSW pada sambungan butt. a. Pencekaman benda kerja pada *back plate*, b. FSW *tool*, c. Bagian-bagian dari *tool* pengelasan, d. Gaya-gaya yang terjadi pada *tool* ketika proses Fsw [4]

Tool FSW yang berputar bergerak searah dengan alur pengelasan, permukaan depan dari *probe tool*, (dibantu oleh *feature* pada *probe* jika ada), memaksa *plasticed material* dari kedua sisi material yang akan dilas ke arah belakang *probe*. Akibatnya material dipindahkan dari permukaan depan *tool* ke

belakang *probe tool* (ketika material sedang diaduk) dan ditempa oleh permukaan *shoulder* yang bersentuhan dengan bidang benda kerja. Beberapa orang percaya bahwa gerakan berputar (*stirring*) bisa memecah oksigen pada permukaan *faying*, sehingga ikatan antar sambungan menghasilkan permukaan yang bersih [4]. Perlu dicatat bahwa untuk menghasilkan sambungan yang penuh (*closure of root*) maka pin harus sedekat mungkin dengan *backplate* dan *shoulder* harus menyentuh permukaan benda kerja. *Open root* (kurangnya penetrasi) berpotensi besar untuk mengalami kegalatan pada sambungan. Pada gambar di atas bisa dilihat bahwa sumbu dari *spindle* dan benda kerja tidak benar-benar tegak lurus 90° , ada kemiringan sekitar $2-4^\circ$, kemiringan ini bisa didapat dengan cara memiringkan *spindle* mesin atau memiringkan benda kerja. Hal ini dapat membantu pemadatan material pada bagian belakang tool, tetapi juga mempunyai kelemahan yaitu berkurangnya kemampuan (*ability*) untuk eksekusi proses pengelasan *non-linear* dan juga bisa mengurangi kecepatan pengelasan (*travel speed weld*) [7].

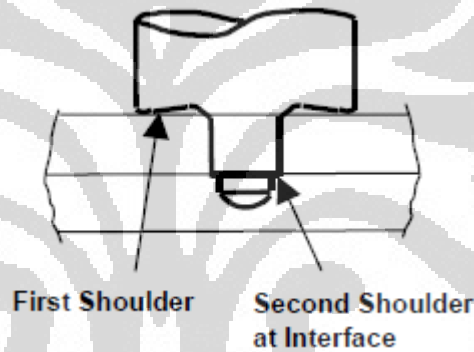
Konsekuensi dari metode FSW adalah adanya lubang (*key hole*) yang terjadi diakhir pengelasan. Terlebih lagi untuk pengelasan baja dan material alloy lainnya, pelubangan awal (*predrill*) berdiameter kecil diperlukan di area *butt line* yang bertujuan untuk mengurangi gaya yang terjadi ketika *tool* berpenetrasi ke dalam benda kerja. Sangat disarankan adanya proses permesinan akhir (*finishing*) dari benda kerja pada awal dan akhir sambungan karena *strength* pada posisi ini memiliki nilai yang paling rendah dibanding posisi lain [8]. Proses *finishing* bisa dilakukan dengan menghilangkan benda kerja kira-kira setebal benda kerja atau lebih.



Gambar 2.5. Variasi kekerasan sepanjang sambungan butt [4]

2.3.2 Sambungan Tumpuk (*Lap Joint*)

Prinsip operasional dari sambungan tumpuk tidak berbeda jauh dengan sambungan butt kecuali tidak adanya *butt line*, dimana *tool* berada diantara benda kerja sehingga *tool* harus menembus benda kerja teratas. Hal ini merupakan perbedaan yang mendasar antara *butt joint* dengan *lap joint* [9]. Pada *butt joint*, putaran utama terjadi di permukaan antar sambungan, berbeda dengan *lap joint* yang sambungannya tidak berada di permukaan sambungan, tetapi berada diantara permukaan tumpukan sambungan. Dari desain toolnya pun berbeda, jika di *butt joint tool* FSW hanya memiliki satu *shoulder*, maka di *lap joint tool* FSW memiliki dua *shoulder* yang lokasinya berada di permukaan benda kerja bawah.



Gambar 2.6. Tool untuk sambungan tumpuk [4]

Pada sambungan tumpuk, ujung *probe* dari *tool* FSW harus menembus benda kerja bagian atas, dan harus menembus sebagian pada benda kerja di bawahnya. Oleh karena itu, ujung pin tidak perlu sampai mendekati permukaan bawah benda kerja bagian bawah, karena berbeda dengan *butt joint*, pada *lap joint* sambungan las tidak terfokus pada pembentukan penutupan akar (*root closure*) [4]. Namun demikian, kita tetap harus memperhitungkan efek dari faktor kedalaman penetrasi terhadap sifat mekanisambungan. Takikan pada kedua sisi dari sambungan merupakan daerah potensial terjadinya retakan dan berpengaruh besar terhadap sifat mekanik. Secara umum, biasanya sambungan tumpuk tidak sekuat sambungan *butt* yang kekuatannya bisa menggantikan fungsi dari *fasteners* [10].

2.4 KETETAPAN DAN TERMINOLOGI FSW

Berdasarkan ketentuan yang dikemukakan oleh Colligan, benda kerja FSW dibagi menjadi 2 bagian, yaitu sisi *advancing* dan sisi *retreating* [11]. Sisi dari *welding tool* yang searah dengan arah pengelasan disebut sisi *advancing*. Dan sisi lawannya dimana permukaan bergerak berlawanan dengan arah pengelasan disebut sisi *retreating*. Seperti kita ketahui sebelumnya, posisi benda kerja dan FSW tool mempunyai kemiringan sebesar Θ° . Colligan [11] dan Hirano [12] mengindikasikan bahwa kemiringan sudut berpengaruh pada menjauhnya permukaan sambungan (*face and toe*) dari permukaan benda kerja. Kemiringan pun menambah kedalaman dari (*P*) *shoulder plunge*, dimana :

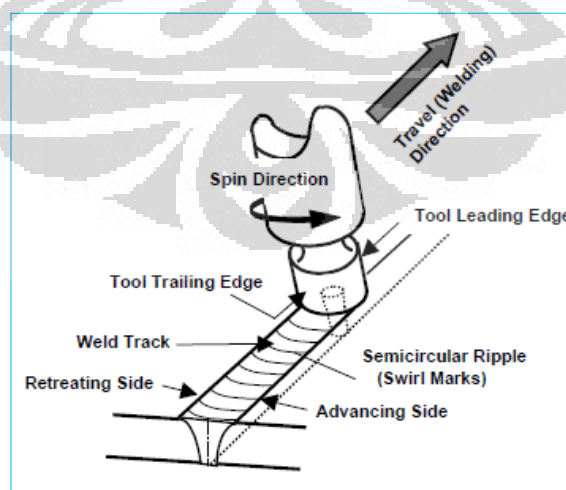
$$P = 0.5 D \sin \Theta \quad (2.1)$$

Dimana : P = Kedalaman *tool* (*shoulder plunge*)

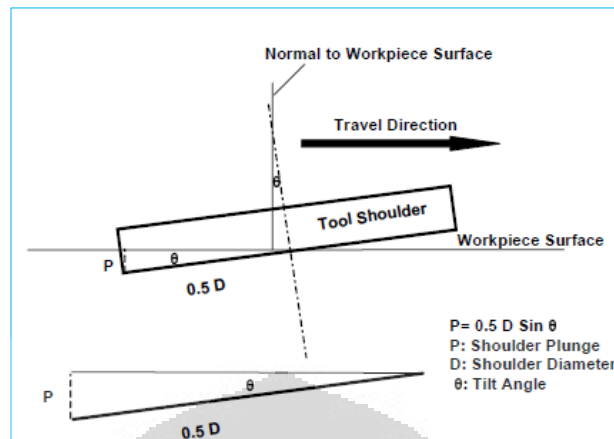
D = diameter *shoulder*

Θ = kemiringan *tool*

Shoulder plunge didefinisikan sebagai jarak *shoulder* terendah *tool* diukur dari permukaan benda kerja.

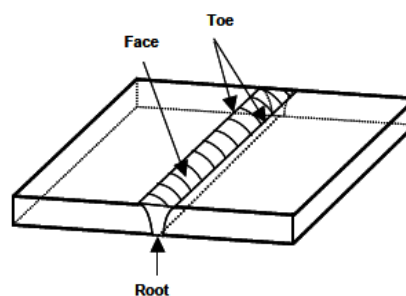


Gambar 2.7. Terminologi FSW [4]

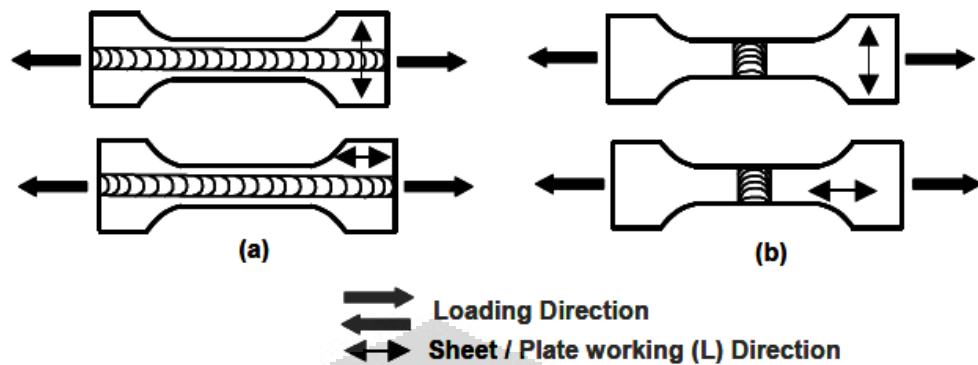


Gambar 2.8. Kedalaman *Shoulder* (*shoulder plunge*) [4]

Face, *root* dan *toe* merupakan istilah yang biasa digunakan pada sambungan *butt*. Istilah *undermatching* dan *overmatching*, masing-masing mengindikasikan jika kekuatan sambungan FSW lebih rendah dibanding material induk (*base material*) dan jika kekuatan sambungan FSW lebih tinggi dibandingkan dengan *base material*. Istilah lainnya adalah *joint efficiency*, yang didefinisikan sebagai ratio dari $(F_{tu})_{joint}/(F_{tu})_{base\ metal}$, dan biasa dituliskan dalam persentase [4]. Nilai kekuatan maksimal dari *base metal* berdasarkan pada pengujian sambungan pada arah yang sama. Lebih jauh lagi, jika sambungan diuji pada arah longitudinal dari produk, maka nilai itulah yang menjadi nilai kekuatan maksimum dari *base metal* pada arah longitudinal. Begitu juga dengan nilai kekuatan maksimum transversal dari *base metal* harus digunakan jika sambungan diuji dengan arah transversal dari produk.



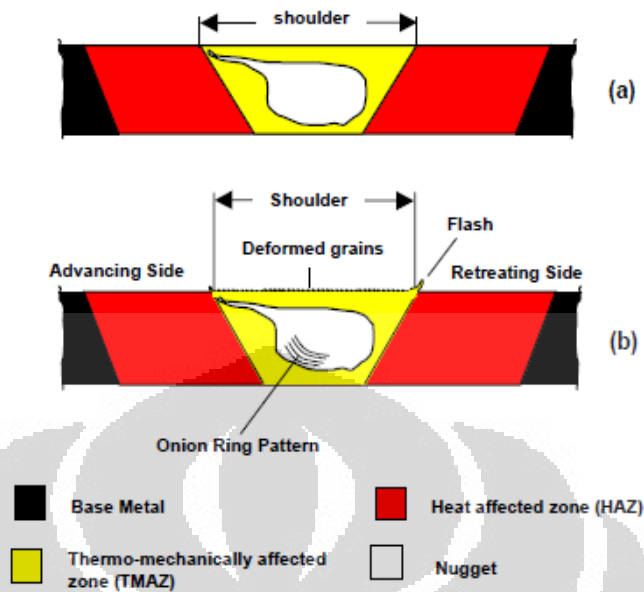
Gambar 2.9. *Face*, *toe* dan *root* pada FSW [4]



Gambar 2.10. Arah uji tarik berdasarkan orientasi pengelasan. a. Orientasi Longitudinal (sambungan las sejajar arah pembebanan), b. Orientasi Transversal (sambungan tegak lurus arah pembebanan) [4]

2.5 PROFIL SAMBUNGAN & ZONA PENGELASAN

Berdasarkan TWI [5], profil umum dari sambungan butt berupa 4 zona trapezoid. Zona pertama adalah *unaffected base metal*, dimana pada zona tersebut tidak terjadi perubahan struktur mikro atau sifat dari material. Zona yang kedua adalah *Heat Affected Zone (HAZ)*, dimana material terkena pengaruh panas tetapi tidak sampai mengalami deformasi plastis, walaupun terjadi perubahan mikrostruktur. Zona yang ketiga adalah *Thermodynamically Affected Zone (TMAZ)*, dimana pada zona ini terjadi deformasi material dan mikrostruktur akibat pengaruh panas. Zona yang terakhir adalah *nugget* yang merupakan area rekristalisasi dari TMAZ. Beberapa orang menyebut *nugget* sebagai *stir zone (SZ)*, ada juga yang menyebutnya *dynamically recrystallized zone (DXZ)*. Begitu juga TMAZ, beberapa orang menyebutnya *Heat and deformation affected zone (HDAZ)* atau *Partial recrystallized zone (PRZ)* [4].



Gambar 2.11. Profile sambungan butt [4]

Terdapat beberapa hal penting yang ditambahkan dalam ilustrasi 2.11, khususnya, adanya *deformasi* butiran atau tanda lingkaran (*swirl marks*) di bawah *shoulder*, identifikasi area *advancing* dan *retreating*, *flash* di area sambungan dan *union ring pattern*. Ilustrasi mengindikasikan bahwa *nugget* berbentuk asimetri dan posisinya memanjang ke arah sisi *advancing*. Walaupun tidak tergambar pada ilustrasi 2.11, lebar dari TMAZ dan HAZ pada area *advancing* dan *retreating* sebetulnya tidaklah sama. Pada ilustrasi tersebut terlihat bahwa bentuk dari *union ring* lebih dominan di sisi *advancing*. *Swirl marks* dan *weld flash* yang tergambar pada ilustrasi 2.11, dapat merugikan dari segi *fatigue performance* dan dapat dihilangkan untuk aplikasi tertentu. Pemanasan suhu rendah sangat disarankan untuk mengurangi *fatigue* dan secara bersamaan juga dapat memperbaiki tegangan sisa [4].

2.6 VARIABEL PROSES

Profil sambungan, struktur mikro, dan sifat material ditentukan oleh ketebalan dan jenis material yang dilas serta pemilihan variabel proses pengelasan [4]. Variabel proses meliputi parameter pengelasan (kecepatan, kemiringan tool,

dll), *tool design* (konfigurasi dan material) dan di dalam sambungan *butt* terkadang parameter dari material dan ketebalan *back plate* ikut diperhitungkan.

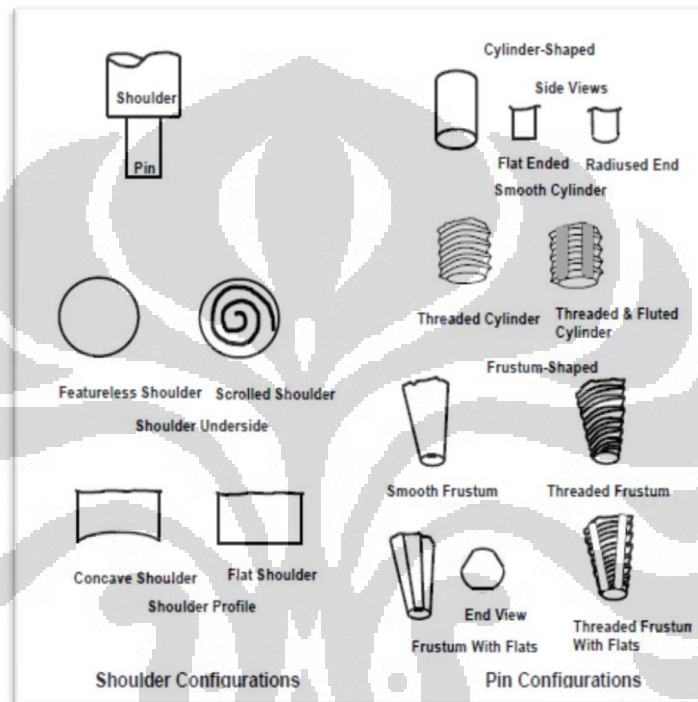
2.6.1 Parameter pengelasan (*Welding Parameter*)

Parameter pengelasan dari FSW meliputi kecepatan putar (*rotational speed*), kecepatan tempuh (*travel speed*), gaya normal (*normal force*), *lateral force*, kemiringan *tool*, kedalaman *shoulder* (*shoulder plunge*), kedalaman penetrasi *probe* (*butt joint*), kedalaman penetrasi probe pada benda terbawah (*lap joint*), dll. Parameter pengelasan biasanya dipublikasikan di lingkungan yang terbatas, sehingga sedikit sekali yang dipublikasikan untuk umum. Walaupun dipublikasi biasanya ada beberapa parameter yang memang disembunyikan dan hanya sedikit yang disebutkan seperti kedalaman penetrasi *probe*, *shoulder plunge*, dan kemiringan. Parameter yang biasanya disembunyikan adalah *rotational speed*, *travel speed*, *tool design* dll. Secara umum kecepatan tempuh dan kecepatan putar yang lambat biasanya digunakan untuk material yang keras atau material yang tipis. Meningkatkan kecepatan putar atau menurunkan kecepatan tempuh cenderung akan meningkatkan masukan panas dan temperature pengelasan [4]. Bagaimanapun, peningkatan atau penurunan kecepatan putar dan kecepatan tempuh yang drastis bisa menimbulkan efek merugikan. Walaupun begitu penelitian dalam pengembangan kecepatan tempuh terus berkembang untuk alasan ekonomis.

2.6.2 Perancangan tool (*Tool Design*)

Pada awal penemuan FSW, *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 [4]. Salah satu lembaga yang terus mengembangkan rancangan *tool* adalah TWI. *Probe* berulir diciptakan untuk membantu memastikan deformasi plastis yang terjadi pada benda kerja tersebar secara sempurna di seputar *probe*, dan dari part yang atas menuju part yang bawah. Hal ini memungkinkan percampuran material dilakukan pada putaran yang lebih tinggi dan menghasilkan kualitas yang lebih baik karena bisa

mereduksi kekosongan sambungan [13]. *Threaded pin*, *Fluted pin* dan *frustum pin* dengan bagian bawah rata ditemukan untuk tujuan mempercepat *travel speed*, menyempurnakan *mixing* material, dan memperbaiki kualitas pengelasan. *Scroll shoulder* dan *concave shoulder* diciptakan untuk mengurangi efek *undercutting* dan *flash* pada sambungan yang ditimbulkan oleh bagian bawah tool shoulder [7].



Gambar 2.12. Konfigurasi shoulder dan pin [4]

Perkembangan perancangan *tool* dari sederhana menjadi kompleks, diiringi dengan berkembangnya material dari tool itu sendiri. Material *tool* dari FSW harus mempunyai temperatur lebur (*melting point*) yang tinggi, *physical* dan *chemical wear resist*, dan efektif melepaskan panas pada saat proses las berlangsung. Beberapa *tool* yang sukses digunakan untuk FSW adalah polycrystalline cubic boron nitride (PCBN), AISI 316 dan AISI 310 stainless steel dan alloy 600 berbasis nickel alloy [6].

Perancangan *tool* merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi struktur mikro, *profil* dan sifat mekanik sambungan. Material *tool* merupakan

faktor yang menentukan akan kehandalan *tool*, koefisien gesek, dan pembangkitan *heat*. Oleh karena itu perancangan tool merupakan hal yang sangat penting dari FSW.

2.7 UJI MEKANIK (*MECHANICAL TESTING*)

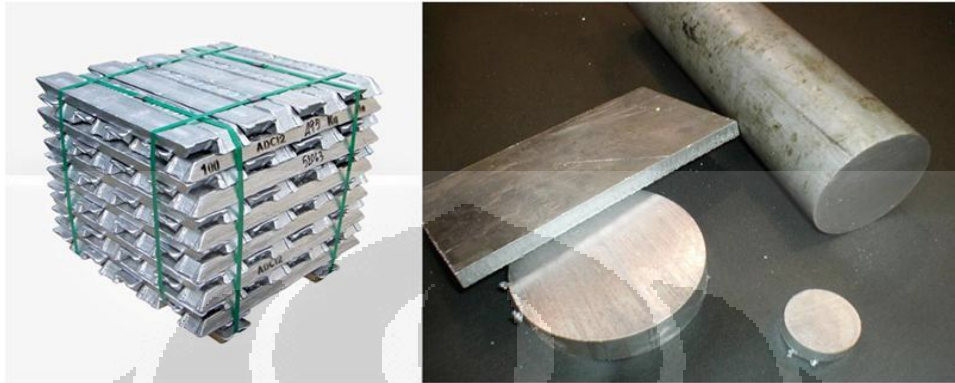
Pengujian hasil pengelasan FSW bisa melalui pengujian rusak benda uji (*destructive test*) dan pengujian tanpa merusak benda uji (*undestructive test*). Sambungan butt bisa diuji dengan visual, uji tarik, uji bengkok (*bend test*), X-ray, struktur mikro dll. Uji tarik dan bengkok bisa dilakukan secara transversal atau longitudinal bergantung pada kebutuhan aplikasinya. Benda uji biasanya diambil dari potongan benda kerja hasil pengelasan. Uji tegangan geser (*ultimate shear strength*) dilakukan dengan *single-shear testing*, menggunakan specimen yang ditakik pada bagian sampingnya untuk memfokuskan fracture yang terjadi. Uji ini cukup ideal untuk mengetahui data spesifik region pengelasan. Uji bengkok (*bend test*) digunakan untuk mengetahui data kualitatif dari *ductility* sambungan longitudinal dan transverse.

2.8 MATERIAL ALUMINIUM

Aluminium paduan adalah paduan material dimana Aluminium menjadi bahan utamanya sedangkan pepaduan yang biasanya sering digunakan adalah Tembaga(Cu), Silikon(Si), Magnesium(Mg), Mangan (Mn) dan Zinc(Zn).

Aluminium dikelompokkan menjadi dua bagian besar, yaitu Aluminium Tuang (*Cast*) dan Aluminium Tempa (*Wrought*), dan keduanya dibagi lagi kedalam sub kelompok menjadi *Heat Treatable* dan *Non-Heat Treatable*. 85% dari material diatas biasanya digunakan untuk material tempa dalam bentuk *rolled plate*, kertas (*sheet*) dan material Ekstrusi. Aluminium tuang memiliki biaya total yang lebih rendah bila dibandingkan dengan Aluminium tempa karena aluminium jenis ini memiliki titik lebur yang rendah, sehingga energi yang dibutuhkan lebih

rendah, tetapi memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah pula dibandingkan dengan aluminium tempa.



Gambar 2.13. Aluminium tuang dan tempa [14]

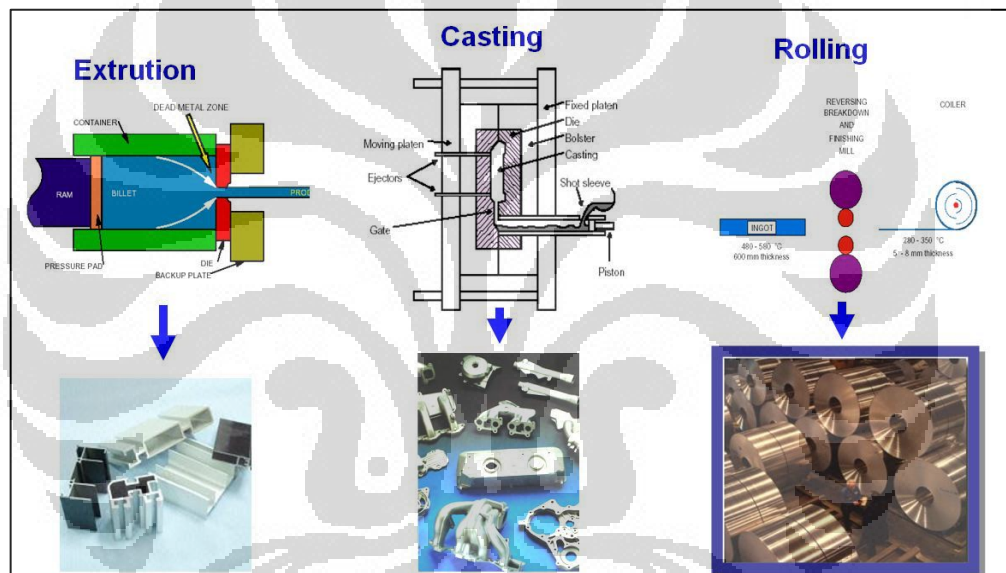
Material ini banyak digunakan pada struktur atau part-part yang menginginkan beban yang ringan dan tahan karat, karena material ini memiliki berat jenis rendah dan ketahanan karat yang baik.

Pada dasarnya Aluminium memiliki beberapa karakter utama yaitu :

1. Ringan : berat jenis rendah ($2,7 \text{ gr/cm}^3$), hanya $1/3$ baja
2. *Ratio strength to weight* (kekuatan/berat) : sangat baik
3. Temperatur lebur rendah (660°C), sehingga peralatan peleburan lebih sederhana
4. Sifat mampu cor (*castability*) sangat baik
5. Sifat mampu mesin (*machinability*) baik
6. Sifat permukaan (*surface finish*) baik
7. Ketahanan korosi baik
8. Konduktor panas dan listrik yang baik
9. Mudah dipadu (*alloying*) dengan unsur lain untuk menghasilkan sifat yang diinginkan

10. BJ rendah, mudah tercampur dengan pengotor (dross) oksida misal Al_2O_3 yang BJ (2.1 gr/mm^3) nya hampir sama BJ Aluminium Cair (2.3 gr/mm^3)
11. Sangat mudah mengikat gas Hidrogen dalam kondisi cair

$$3\text{H}_2\text{O} + 2 [\text{AL}] \text{ ---- } 6 [\text{H}] + (\text{AL}_2\text{O}_3)$$
12. Sebaiknya menggunakan *degasser* atau GBF (Gas Bubble Floation = Argon Treatment)
13. Mengalami penyusutan (*shrinkage*) yang cukup Tinggi 3.5 – 8.5 % (rata-rata 6 %)



Gambar 2.14. Metode pembentukan Aluminium [14]

Menurut standard yang digunakan di dunia seperti JIS, ASM, ISI, ISO dll material aluminium dibagi kedalam beberapa kelas dengan penamaan sesuai dengan standard yang digunakan. Pengklasifikasian ini berdasarkan komposisi kimia paduannya dan juga sifat mekaniknya.

Tabel 2.1. Pembagian material berdasarkan komposisi kimia [15]

Japan												
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Pb	Cr	similar to*
AC1A	1,2 max	0,4 max	4,0-5,0	0,3 max	0,2 max	0,05 max	0,3 max	0,05 max	0,25 max	0,05 max	0,05 max	
AC1B	0,2 max	0,3 max	4,2-5,0	0,4 max	0,2-0,35	0,05 max	0,1 max	0,05 max	0,05-0,3	0,05 max	0,05 max	AC-21100, Z1201
AC2A	4,0-6,0	0,7 max	3,0-4,5	0,55 max	0,25 max	0,3 max	0,55 max	0,05 max	0,2 max	0,15 max	0,15 max	AC-45100 / AC-45200
AC2B	5,0-7,0	0,8 max	2,0-4,0	0,5 max	0,5 max	0,35 max	1,0 max	0,1 max	0,2 max	0,2 max	0,2 max	AC-45200, 318.0 / 319.0, Z1107
AC3A	10,0-13,0	0,7 max	0,25 max	0,35 max	0,15 max	0,1 max	0,3 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,15 max	AC-44000 / AC-44100 / AC-44200 / AC-47000, Z1102
AC4A	8,0-10,0	0,4 max	0,25 max	0,3-0,6	0,35-0,6	0,1 max	0,25 max	0,05 max	0,2 max	0,1 max	0,15 max	AC-43200 / AC-43300, 359.0, Z1104
AC4B	7,0-10,0	0,8 max	2,0-4,0	0,5 max	0,5 max	0,35 max	1,0 max	0,1 max	0,2 max	0,2 max	0,2 max	AC-46200, 332.0
AC4C	6,5-7,5	0,4 max	0,25 max	0,35 max	0,25-0,45	0,1 max	0,35 max	0,05 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	AC-42000 / AC-42200, 356.0 / A356.0 / A444.0, Z1101 / Z1101A
AC4CH	6,5-7,5	0,17 max	0,2 max	0,1 max	0,3-0,45	0,05 max	0,1 max	0,05 max	0,2 max	0,05 max	0,05 max	AC-42100, Z1101 / Z1101A / Z1114A
AC4D	4,5-5,5	0,5 max	1,0-1,5	0,5 max	0,45-0,6	0,2 max	0,3 max	0,05 max	0,2 max	0,1 max	0,15 max	AC-45300, 355.0, Z1105 / Z1105A
AC5A	0,6 max	0,7 max	3,5-4,5	0,35 max	1,3-1,8	1,7-2,3	0,15 max	0,05 max	0,2 max	0,05 max	0,15 max	242.0
AC7A	0,2 max	0,25 max	0,1 max	0,6 max	3,6-5,5	0,05 max	0,15 max	0,05 max	0,2 max	0,05 max	0,15 max	AC-51300
AC8A	11,0-13,0	0,7 max	0,8-1,3	0,15 max	0,8-1,3	0,8-1,5	0,15 max	0,05 max	0,2 max	0,05 max	0,1 max	AC-48000, Z1108 / Z1109
AC8B	8,5-10,5	0,8 max	2,0-4,0	0,5 max	0,6-1,5	0,1-1,0	0,5 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	
AC8C	8,5-10,5	0,8 max	2,0-4,0	0,5 max	0,6-1,5	0,5 max	0,5 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	
AC9A	22,0-24,0	0,7 max	0,5-1,6	0,5 max	0,6-1,5	0,5-1,5	0,2 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	
AC9B	18,0-22,0	0,7 max	0,5-1,6	0,5 max	0,6-1,5	0,5-1,5	0,2 max	0,1 max	0,2 max	0,1 max	0,1 max	

Tabel 2.2. Contoh Pembagian material berdasarkan sifat mekanik (*mechanical properties*) [15]

Alloy type		Temper	Tensile strength (min) [ksi] ([MPa])	Yield strength (min) [ksi] ([MPa])	Elongation in 2 in [%]
ANSI	UNS				
201.0	A02010	T7	60.0 (414)	50.0 (345)	3.0
204.0	A02040	T4	45.0 (310)	28.0 (193)	6.0
242.0	A02420	O	23.0 (159)	N/A	N/A
		T61	32.0 (221)	20.0 (138)	N/A
A242.0	A12420	T75	29.0 (200)	N/A	1.0
295.0	A02950	T4	29.0 (200)	13.0 (90)	6.0
		T6	32.0 (221)	20.0 (138)	3.0
		T62	36.0 (248)	28.0 (193)	N/A
		T7	29.0 (200)	16.0 (110)	3.0
319.0	A03190	F	23.0 (159)	13.0 (90)	1.5
		T5	25.0 (172)	N/A	N/A
		T6	31.0 (214)	20.0 (138)	1.5
328.0	A03280	F	25.0 (172)	14.0 (97)	1.0
		T6	34.0 (234)	21.0 (145)	1.0
355.0	A03550	T6	32.0 (221)	20.0 (138)	2.0
		T51	25.0 (172)	18.0 (124)	N/A
		T71	30.0 (207)	22.0 (152)	N/A
C355.0	A33550	T6	36.0 (248)	25.0 (172)	2.5
356.0	A03560	F	19.0 (131)	9.5 (66)	2.0
		T6	30.0 (207)	20.0 (138)	3.0
		T7	31.0 (214)	N/A	N/A
		T51	23.0 (159)	16.0 (110)	N/A
		T71	25.0 (172)	18.0 (124)	3.0
A356.0	A13560	T6	34.0 (234)	24.0 (165)	3.5
		T61	35.0 (241)	26.0 (179)	1.0
443.0	A04430	F	17.0 (117)	7.0 (48)	3.0
B443.0	A24430	F	17.0 (117)	6.0 (41)	3.0
512.0	A05120	F	17.0 (117)	10.0 (69)	N/A
514.0	A05140	F	22.0 (152)	9.0 (62)	6.0
520.0	A05200	T4	42.0 (290)	22.0 (152)	12.0
535.0	A05350	F	35.0 (241)	18.0 (124)	9.0
705.0	A07050	T5	30.0 (207)	17.0 (117) [†]	5.0
707.0	A07070	T7	37.0 (255)	30.0 (207) [†]	1.0
710.0	A07100	T5	32.0 (221)	20.0 (138)	2.0
712.0	A07120	T5	34.0 (234)	25.0 (172) [†]	4.0
713.0	A07130	T5	32.0 (221)	22.0 (152)	3.0
771.0	A07710	T5	42.0 (290)	38.0 (262)	1.5
		T51	32.0 (221)	27.0 (186)	3.0
		T52	36.0 (248)	30.0 (207)	1.5
		T6	42.0 (290)	35.0 (241)	5.0
		T71	48.0 (331)	45.0 (310)	5.0

2.9 ANALISIS VARIANS (ANOVA) [16]

Analisis varians adalah suatu teknik statistik yang memungkinkan kita untuk mengetahui apakah dua atau lebih mean populasi akan bernilai sama dengan menggunakan data dari sampel-sampel masing-masing populasi.

Prosedur pengujian dari uji Anova adalah :

1. Pernyataan hipotesis H_0 dan H_1 . Dimana H_0 dan H_1 merupakan hipotesis yang bertolak belakang.

2. Pemilihan tingkat kepentingan (*level of significance*) α .

Biasanya menggunakan tingkat kepentingan 0.05 atau 0.01.

3. Penentuan Distribusi yang digunakan.

Dalam uji anova ini yang digunakan adalah distribusi probabilitas F. Nilai-nilai dari distribusi F dapat diketahui apabila kita mempunyai nilai

- Tingkat kepentingan (*level of confidence*)
- Derajat kebebasan pembilang (df_{num}) = $k - 1$, (k : jumlah populasi)
- Derajat kebebasan penyebut (df_{den}) = $T - k$, (T : jumlah total anggota sampel diseluruh populasi yang diuji)

4. Pendefinisian daerah-daerah tolakan atau kritis

Daerah penerimaan dan penolakan dibatasi oleh nilai kritis F_α .

5. Pernyataan antara keputusan

Tolak H_0 dan Terima H_1 jika $RU_F > F_\alpha$. Jika tidak maka terima H_0

6. Perhitungan rasio uji (test ratio)

$$\sigma_{antara}^2 = \frac{n_1(x_1 - \bar{X})^2 + n_2(x_2 - \bar{X})^2 + n_3(x_3 - \bar{X})^2}{k-1}$$

$$\sigma_{dalam}^2 = \frac{\sum d_1^2 + \sum d_2^2 + \sum d_3^2}{T-k}$$

$$RU_f = \frac{\sigma_{antara}^2}{\sigma_{dalam}^2}$$

7. Pengambilan keputusan secara statistik.

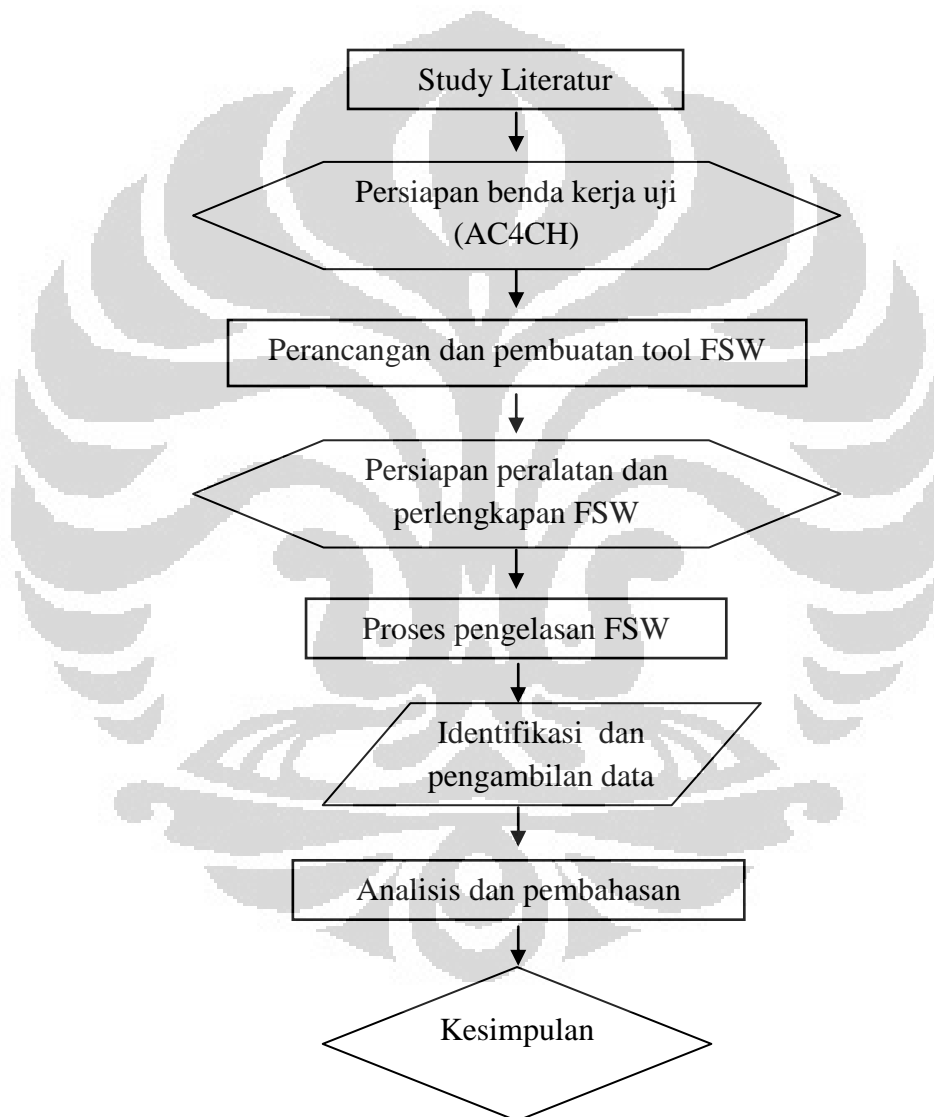
Jika nilai rasio uji berada didaerah penerimaan maka hipotesis nol diterima, dan jika diluar daerah penerimaan maka hipotesis nol ditolak dan terima hipotesis satu.

BAB 3

PENGEMBANGAN PROSES FSW

3.1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN

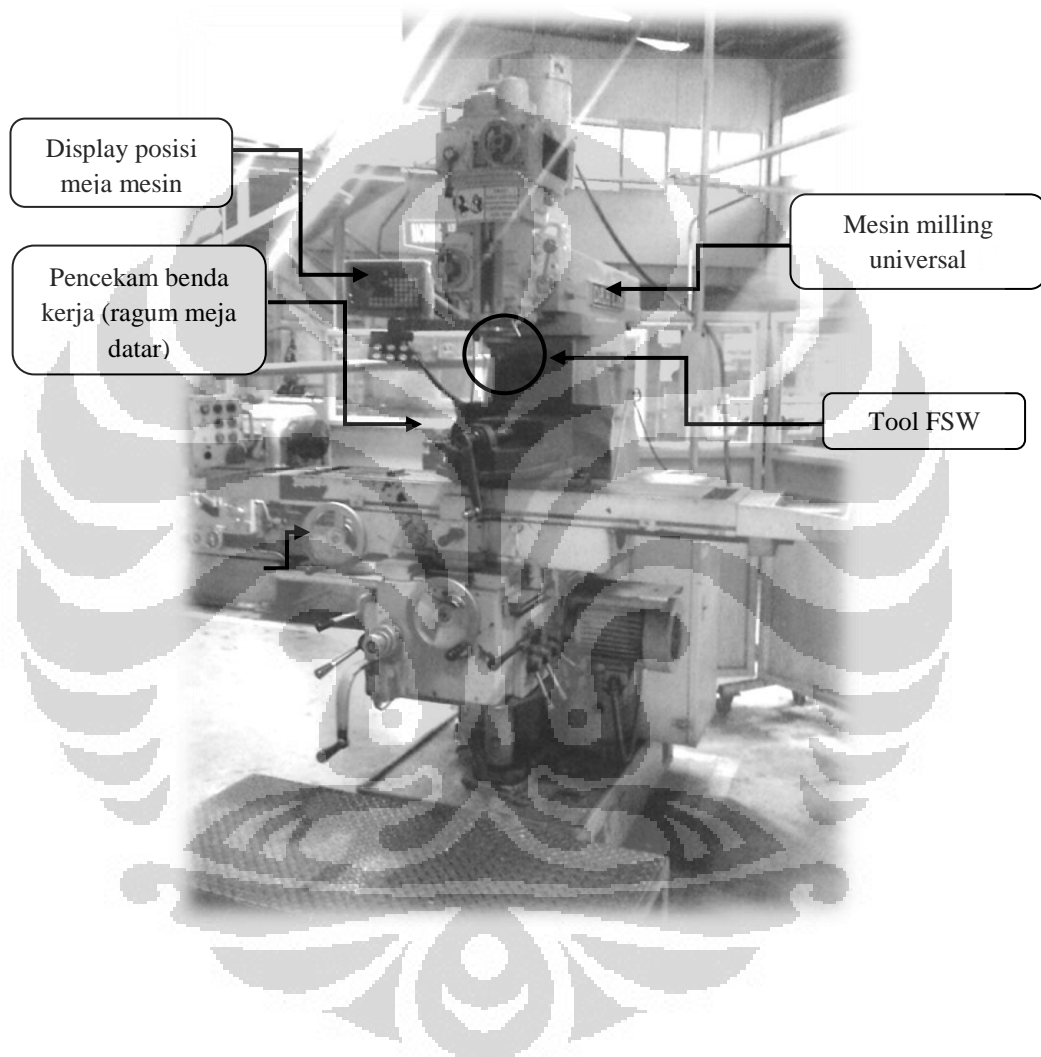
Langkah-langkah utama dari percobaan pengelasan dengan metode FSW dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini.



Gambar 3.1. Diagram alir percobaan FSW pada material AC4CH

3.2 ALAT DAN MATERIAL PENGUJIAN

Secara garis besar alat dan material pengujian yang harus disiapkan adalah benda kerja pengelasan, tool pengelasan, mesin milling beserta aksesorisnya.



Gambar 3.2. Mesin, tool, dan perlengkapan percobaan FSW

3.2.1 Benda uji pengelasan (*specimen*)

Spesimen uji yang akan digunakan adalah aluminium AC4CH. Dalam dunia industri material ini banyak sekali digunakan dalam komponen *engine* dan komponen sepeda motor. Bentuk kasar dari AC4CH yang digunakan adalah

aluminium ingot hasil dari proses tuang (*casting*). Berikut adalah sifat dari material AC4CH :

Tabel 3.1. *Mekanikal, elektrikal, Thermal, processing dan Componen Elemen properties*
AC4CH [17]

<u>ρ : 2.68 g/cc</u>		<u>0.0968 lb/in³</u>
Mechanical Properties	Metric	Comments
Hardness, Brinell	65.0 - 95.0	AA; Typical; 500 g load; 10 mm ball
Hardness, Knoop	103	Estimated from Brinell Hardness.
Hardness, Rockwell B	49	Estimated from Brinell Hardness.
Hardness, Vickers	90	Estimated from Brinell Hardness.
Tensile Strength, Ultimate	<u>≥ 228 MPa</u>	AA
Tensile Strength, Yield	<u>≥ 152 MPa</u>	AA; 0.2% Offset
Elongation at Break	<u>≥ 3.00 %</u>	AA; in 2 in. (50 mm) or 4D
Modulus of Elasticity	<u>72.4 GPa</u>	In Tension; elastic modulus in compression is typically about 2% higher for aluminum alloys.
Compressive Yield Strength	<u>185 MPa</u>	
Poissons Ratio	0.330	
Fatigue Strength	<u>90.0 MPa</u> @# of Cycles 5.00e+8	Notch Status unknown, R.R. Moore Test
Machinability	50%	0-100 Scale (100=best)
Shear Modulus	<u>27.2 GPa</u>	
Shear Strength	<u>205 MPa</u>	
Electrical Properties	Metric	Comments
Electrical Resistivity	<u>0.00000440 ohm-cm</u>	AA; Typical 39% IACS Conductivity
Thermal Properties	Metric	Comments
Heat of Fusion	<u>389 J/g</u>	
<u>CTE, linear</u>	<u>21.4 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$</u> @Temperature 20.0 - 100 °C	AA; Typical
	<u>23.2 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{C}$</u> @Temperature 20.0 - 300 °C	
Specific Heat Capacity	<u>0.963 J/g·°C</u>	AA; Typical; average over range
Thermal Conductivity	<u>151 W/m-K</u>	AA; Typical at 25°C
Melting Point	557.2 - 612.8 °C	AA; Typical

Solidus	557.2 °C	AA; Typical
Liquidus	612.8 °C	AA; Typical
Processing Properties		
	Metric	Comments
Melt Temperature	677 - 816 °C	
Solution Temperature	535 - 540.6 °C	hold at temperature for 8 hrs; cool in water at 150 to 212°F
Aging Temperature	152 - 157 °C	hold at temperature 3 - 5 hrs; start with solution heat-treated material
Casting Temperature	677 - 788 °C	
Component Elements Properties		
	Metric	Comments
Aluminum, Al	90.1 - 93.3 %	As remainder
Copper, Cu	<= 0.25 %	
Iron, Fe	<= 0.60 %	
Magnesium, Mg	0.20 - 0.45 %	
Manganese, Mn	<= 0.35 %	
Other, each	<= 0.050 %	
Other, total	<= 0.15 %	
Silicon, Si	6.50 - 7.50 %	
Titanium, Ti	<= 0.25 %	
Zinc, Zn	<= 0.35 %	



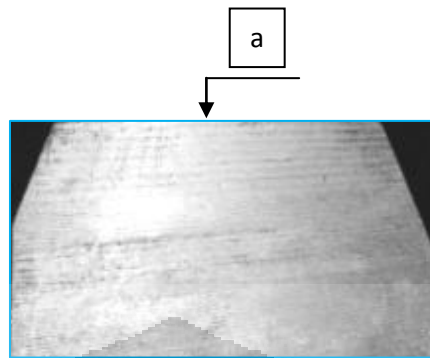
Gambar 3.3. Raw Material Ingot [18]



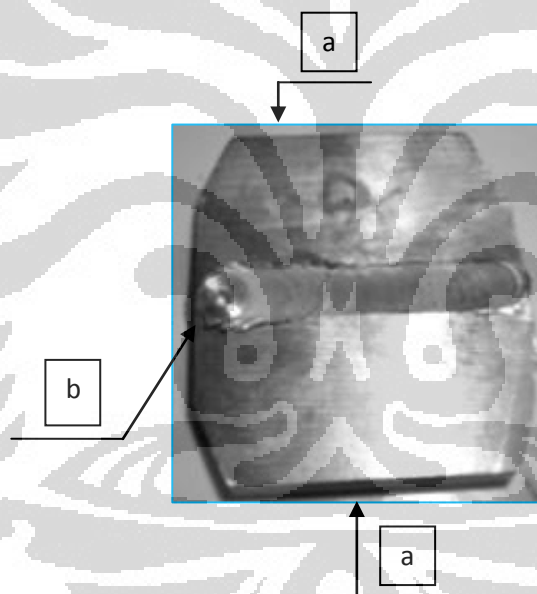
Gambar 3.4. Potongan besar ingot 300x90x80 [18]

Alumunium ingot yang telah dipotong menjadi 3 bagian besar kemudian dimilling persegi (300x90x80) untuk mendapatkan bagian rata yang akan dijadikan patokan untuk proses pemotongan dan pengelasan di dalam ragam mesin.

Pemotongan benda kerja bidang a harus mengambil referensi pada bidang b, sehingga bidang a akan sejajar bidang b.



Gambar 3.5. Benda uji ukuran 90x60x8



Gambar 3.6. Benda uji yang telah dilas

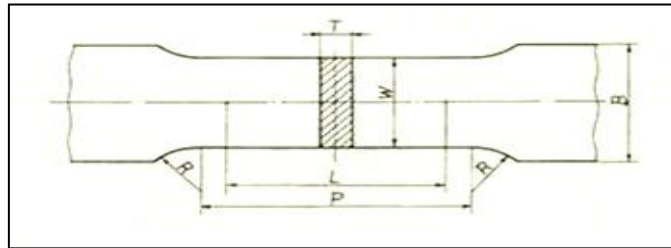
Proses selanjutnya adalah pemilihan bentuk dan dimensi dari benda uji. AC4CH adalah material berdasarkan *standard* JIS, oleh karena itu *standard* JIS digunakan untuk menentukan bentuk benda uji berdasarkan parameter bentuk umum dan tebal benda uji.

Tabel 3.2. Tabel pemilihan benda uji hasil pengelasan [19]

Material		Test piece		Remarks
Form	Dimensions	Proportional	Non Proportional	
Sheet, Plate, Shape, Strip	Over 40 mm in thickness	No. 14A	No. 4, No. 10	For bar form test piece
		No. 14B	-	For flat form test piece
	Over 20 mm up to and incl. 40	No. 14A	No. 4, No. 10	For bar form test piece
	mm in thickness	No. 14B	No. 1A	For flat form test piece
	Over 6 mm up to and incl. 20	No. 14B	No. 1A, No. 5	
	Over 3 mm up to and incl. 6 mm in thickness		No. 5, No. 13A,	
	3 mm or less in thickness		No. 13B,	
Bar	-	No. 2 No. 14A	No. 4, No. 10	-
Wire	-	-	No.9A, No. 9B	-
Pipe	Pipe of small outside dia.	No. 14C	No. 11	For tubular form test piece
	50 mm or less in outside dia.	No. 14B	No. 12A	For arc section test piece
	Over 50 mm up to and incl. 170		No. 12B	
	mm in outside dia.			
	Over 170 mm in outside dia. 200 mm or over in outside dia.	No. 14B	No. 5,	For flat form test piece or arc section test piece
	Thick wall pipe	No. 14A	No. 4	For bar form test piece

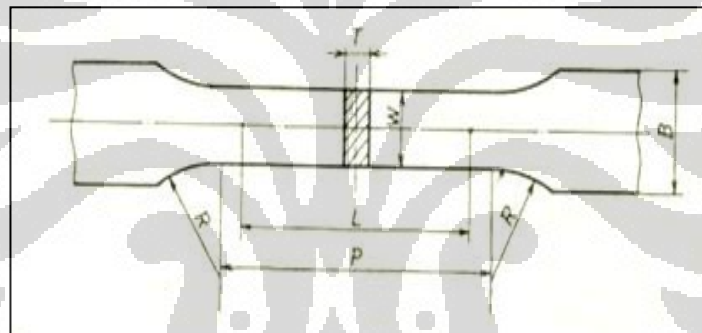
Berdasarkan tabel di atas maka untuk material berbentuk plate, bar atau strip dengan ketebalan 6-20 mm harus menggunakan standard benda uji No. 5 atau No. 13A. Untuk mendapatkan satu nilai parameter ukur yang bisa dibandingkan maka harus ada satu standard yang digunakan dari 2 pilihan ini. Seleksi standard dilakukan berdasarkan kesesuaian dimensi dari benda kerja pengelasan dengan specimen yang akan dibuat.

Berikut ini adalah tabel dan ilustrasi dari test piece yang akan dibuat sebagai benda kerja untuk pengujian tarik.



Width	Gauge Length	Parallel Length	Radius of Fillet	Thickness
W	L	P	R	T
25	50	60 approx.	15 min,	Thickness of mat

Gambar 3.7. Standar benda uji No.5 [19]

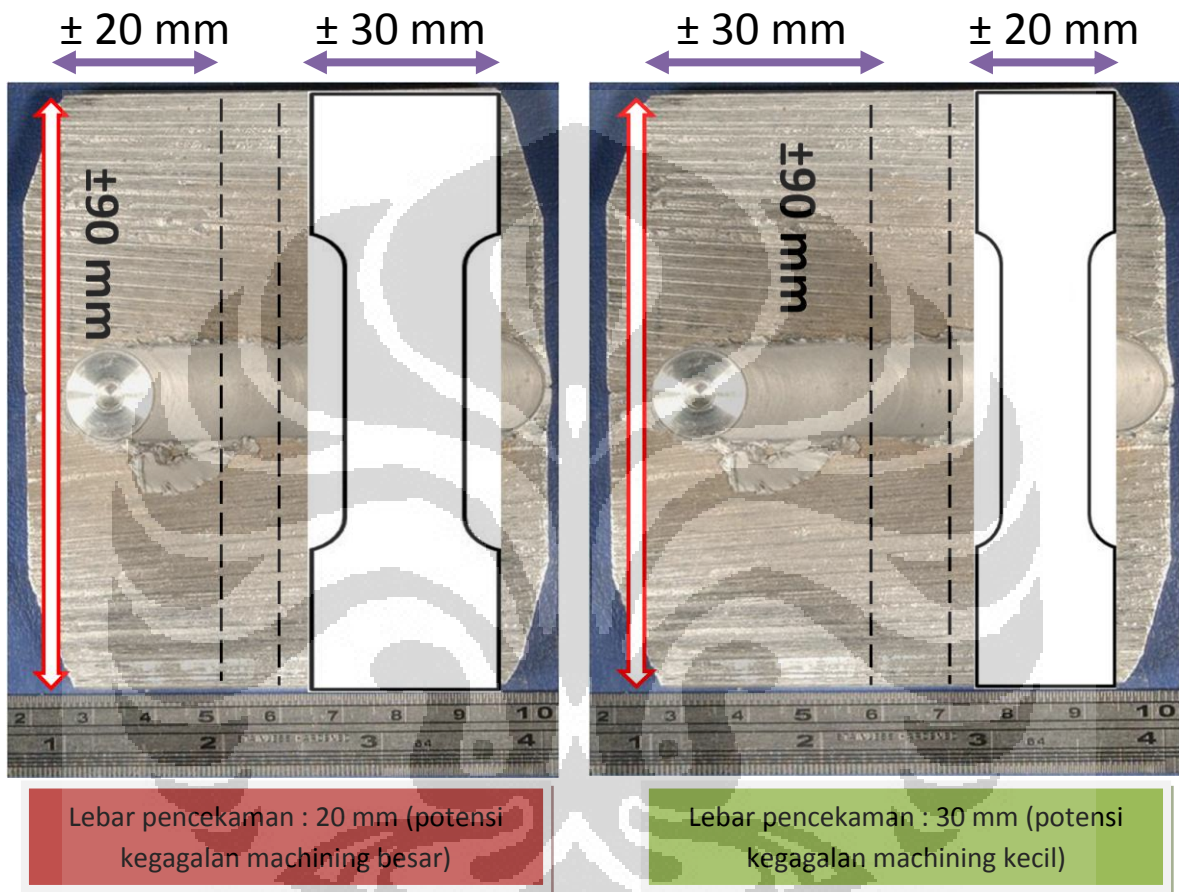


Type of test piece	Width	Gauge Length	Parallel Length	Radius of Fillet	Thickness	Width of gripped portion
W	W	L	P	R	T	T
13A	20	80	120 approx.	20-30	Thickness of mat	-
13B	12.5	50	60 approx.	20-30	Thickness of mat	20 min

Gambar 3.8. Standar benda uji No.13 [19]

Dari dua *standard* benda uji yang ada maka yang sesuai dengan bentuk benda kerja pengelasan aktual adalah spesimen no.13. Spesimen no.5 bisa digunakan akan tetapi menyulitkan pada waktu proses pemesinan karena bidang pengecaman dari benda kerja kurang dari 50%, sehingga berpotensi besar akan mengalami kegagalan pemesinan. Untuk spesimen no.13 bisa digunakan karena lebar

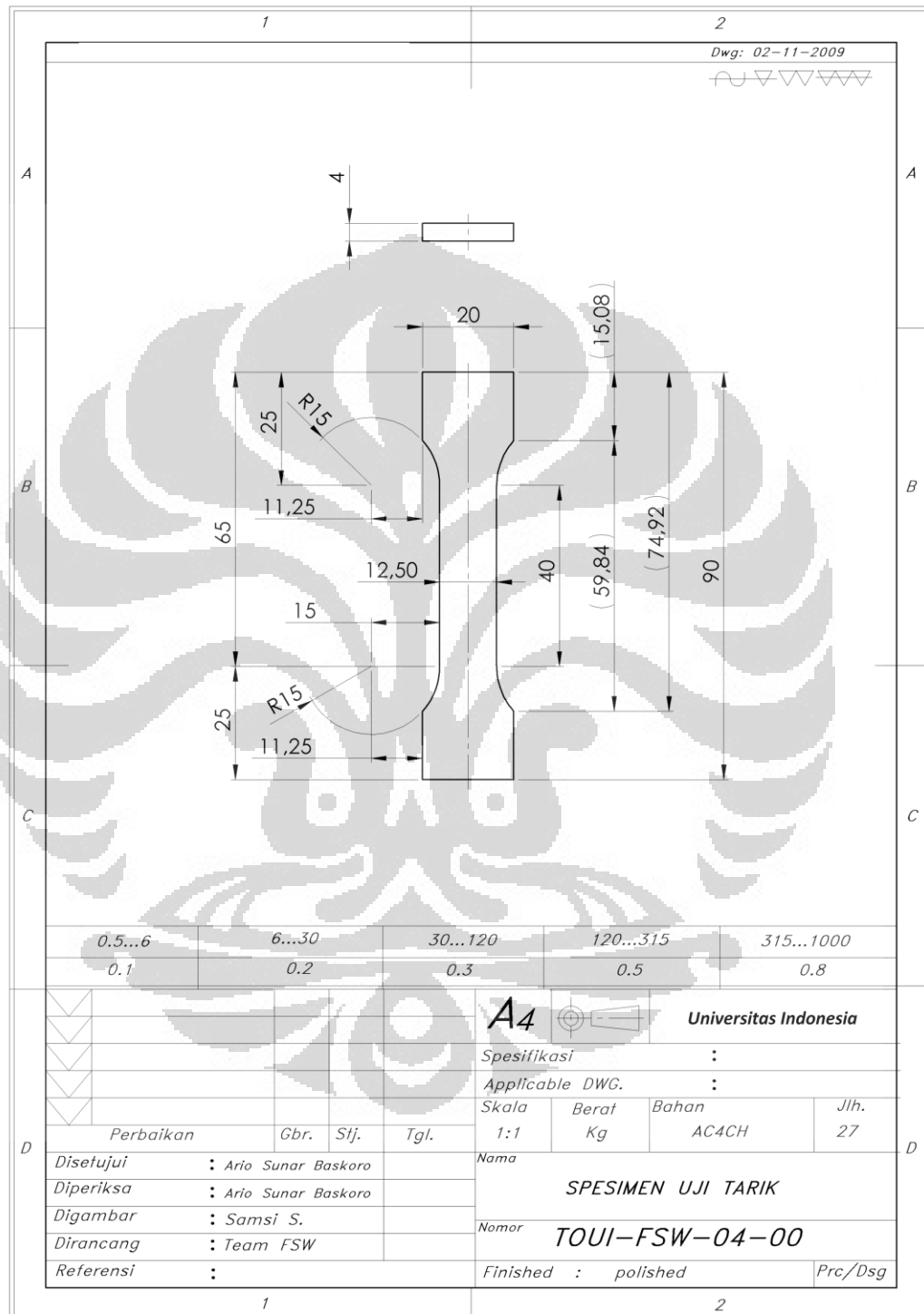
gripped benda uji yang direkomendasikan cukup 20mm, sehingga bidang pencekaman untuk proses pemesinan lanjutan masih cukup lebar sehingga resiko kegagalan akan lebih kecil.



Gambar 3.9. Benda uji No.5

Gambar 3.10. Benda uji No.13

Proses selanjutnya adalah penggambaran ulang dari benda uji tarik untuk proses pemesinan selanjutnya.



Gambar 3.11. Gambar 2D benda uji No.13



Gambar 3.12. Ilustrasi benda uji hasil permesinan lanjut

3.2.2 Tool pengelasan (*Welding tool*)

Tool las mempunyai 3 fungsi utama yaitu membangkitkan panas pada benda kerja, memindahkan material sambungan pengelasan, dan menahan material adukan panas dibawah *tool shoulder*. FSW merupakan proses *deformasi thermomechanical* dimana suhu dari *tool* mendekati temperatur *solidus* dari benda kerja. Semua *tool* FSW dirancang untuk keperluan spesifik untuk menghindari kegagalan dimensional, stabilitas atau *fracture* pada tool.

a. Material Tool

Banyak sekali karakteristik dari material *tool* yang harus diperhatikan, dan biasanya diurutkan berdasarkan tingkat kepentingannya seperti material benda uji pengelasan, *life time* tool yang diinginkan (*thoughness*), Ketersediaan material (standard material yang biasa digunakan) dan kemampuan permesinan (*machinability*). Selain dari sifat fisik (*physical properties*) dari material, beberapa pertimbangan praktis pun mempengaruhi dari pemilihan material.

Tabel 3.2. Pemilihan material untuk FSW tool [6]

Alloy	Thickness		Tool Material
	mm	in.	
Aluminium alloys	< 12	< 0.5	Tool steel
	< 26	<1.02	MP159
Magnesium alloys	< 6	< 0.24	Tool steel, WC
Copper and copper alloys	< 50	<2.0	Nickel Alloy, PCBN, tungsten alloy
	<11	<0.4	Tool steel
Titanium alloys	<6	<0.24	tungsten alloy
Stainless steels	<6	<0.24	PCBN, Tungsten alloy
Low alloy steel	<10	<0.4	WC, PCBN
Nickel alloys	<6	<0.24	PCBN

Berdasarkan pada tabel di atas maka pemilihan *material tool* yang tepat untuk material Aluminium AC4CH dengan ketebalan 8 mm (< 12 mm) adalah tool steel.

Tool Steel merupakan material yang paling banyak digunakan dalam proses FSW karena mayoritas aplikasi FSW adalah untuk pengelasan material aluminium yang mana mudah untuk diproses dengan tool steel. Keuntungan dari penggunaan tool steel adalah ketersediaannya yang melimpah, *machinability* yang baik, murah dan karakteristik material yang baik. Oleh karena itu penelitian ini akan menggunakan *tool steel* sebagai material tool FSW.

Tool FSW (*shoulder*) dirancang untuk menghasilkan panas (friksi dan material deformasi) pada *surface* dan *subsurface region* benda kerja. *Shoulder* juga menghasilkan reaksi *downward forging* untuk konsolidasi material pengelasan. Oleh karena itu proses FSW sering disebut juga sebagai *cold forging process*.

Melihat dari proses yang terjadi pada tool FSW maka material *tool steel* yang dibutuhkan adalah *tool steel* yang mempunyai sifat mampu proses *cold forging*.

Tabel 3.3. *Material Selection* untuk FSW tool steel [20]

Applications and YSS grade Features

YSS grade	Main applications	Features
S-MAGIC (NEW)	Cold work dies for high-tensile steels, SUS, mass production, and general use.	High performance cold work tool steel attaining both extended mold lifespan and outstandingly easy mold fabrication. 60-62 HRC with high temperature tempering. Excellent wear & galling resistance.
SLD	Cold work dies for general use, forming roll, shear.	Cold work die steel with high abrasion resistance for general use, excellent harden-ability and minimal quench stress.
ARK1	Dies for printed circuit board, die plates, stripper plates.	Cold work die steel with high toughness and improved machinability. The same heat treatment conditions as SKD11.
SLD8	Rolling dies, cold forging dies.	62HRC or more with high temperature tempering, superior machinability and toughness.
SLD10	Rolling dies.	Extremely highest hardness in die steels. 62-64HRC, with excellent toughness.
CRD	Drawing dies, blanking dies for mass production, brick liner.	Cold work die steel with highest abrasion resistance.
YCS3	Press forming dies, jigs and tools.	Carbon tool steel for small production to be quenched in oil, easy to heat-treat.
SGT	Dies for deep drawing, gauges.	Cold work die steel with superior machinability for general use. Be careful with quenching large dies and wire electric discharge machining.
ACD37	Dies for deep drawing, gauges.	Vacuum quenched and air quenched steel, improved for SGT as to hardenability and wire electric discharge machining.
HMD5 HMD1	Dies for deep drawing.	Steel for flame hardening, resulting in high hardness and small strain even with air quenched; good weldability.
HPM1	Press forming dies for small production, jigs and tools.	Free cutting and fully hardened steel, good nitriding characteristics.
YXM4 XVC5	Cold forging dies, drawing dies.	High speed steel to prevent from abrasion, seizure and deformation under high pressure.
YXR7	Rolling dies, cold forging dies, roll, cold forging punches, blanking punches.	Matrix high speed steel, extremely highest toughness in 62-65HRC, available to vacuum quenching.
YXR3	Dies to be used for cracking or chip breaking resistance.	Matrix high speed steel for general use, extremely highest toughness in 58-61HRC.
YXR33	Cold forging dies, warm forging dies.	Matrix high speed steel extremely highest toughness in high speed steels.
HAP5R	Cold forging dies, fine blanking dies.	Standard hardness 56-58HRC. Extremely tough Powder Metallurgy process high speed steel.
HAP10	Fine blanking dies.	Extremely tough Powder Metallurgy process high speed steel.
HAP40	Press forming dies for mass production, roll.	P/M high speed steel with high abrasion resistance and toughness for general use.
HAP72	Cold plastic working dies of long life, high performance IC molds.	P/M high speed steel with high hardness and highest abrasion resistance.

Dari tabel 3.3 bisa dilihat bahwa material tool steel yang baik untuk aplikasi *cold forging* adalah material SLD8, YXM1, YXM4, XVC5, YXR7, YXR33, HAP5R. Dilihat dari *features* yang terdapat pada masing-masing material, SLD 8 mempunyai *machinability* yang paling baik diantara yang lain. Material YXM1, YXM4, XVC5, YXR7, YXR33 adalah high speed tool steel (HSS) yang mempunyai karakteristik *thoughness* dan *abration* yang lebih baik, oleh karena itu akan mempunyai *life time* yang lebih lama dan sangat sesuai digunakan untuk keperluan mass produk atau penggunaan pada material yang lebih keras. Walaupun begitu secara biaya material dan biaya permesinan, jelas material SLD8 mempunyai nilai yang lebih baik.

Tabel 3.4. Komparasi karakteristik material tool steel (YSS) [20]

● Comparison of characteristics

YSS grade	Abrasion resistance	Pressure resistance	Strength at elevated temperature	Toughness	Hardenability	Distortion by heat treatment	Machinability	Weldability	Standard hardness (HRC)
S-MAGIC	A	A	B	A ⁻	A ⁺	A ⁺	A ⁻	B	58~62
SLD	A	A	B	B	A ⁺	A ⁺	B	C	57~63
SLD8	A ⁻	A	B ⁺	A ⁻	A ⁺	A	B ⁺	C	58~63
SLD10	A ⁻	A ⁺	A ⁻	A ⁻	A ⁺	A	B ⁻	C	59~65
CRD	A ⁺	A	C	C	B ⁻	B	C	D	57~63
YCS3	D	C	D	C	D	D	A ⁺	B	57~63
SGT	C	B ⁺	D	B	C	D	A	B	57~63
ACD37	B	A ⁻	C	B	A ⁺	A	A	B	55~60
HMD5 HMD1	C	B	D	B	—	—	A	A	55~60
HPM1 HPM2T	D ⁻	D	D	A ⁻	—	—	A ⁻	A	40
YXM1	A	A ⁺	A	A ⁻	B	B	B	C	58~64
YXM4	A ⁺⁺	A ⁺	A ⁺	B	B	B	B ⁻	C	62~66
XVC5	A ⁺⁺⁺	A ⁺⁺	A ⁺⁺	C	B	B ⁻	C	D	63~67
YXR7	A	A ⁺	A	A	A	B	B	C	61~65
YXR3	A ⁻	A	A	A ⁺	B	B	B ⁺	C ⁺	58~61
YXR33	B	B	A ⁺	A ⁺⁺	A	B	B ⁺	C ⁺	54~58
HAP5R	A	A ⁺	A	A ⁺	A	A	B	C	58~62
HAP10	A ⁺	A ⁺	A	A	A	A	B ⁻	C	62~65
HAP40	A ⁺⁺	A ⁺⁺	A ⁺⁺	A ⁻	B	A	C ⁺	C	64~67
HAP72	A ⁺⁺⁺	A ⁺⁺⁺	A ⁺⁺⁺	C	A ⁻	A	C ⁻	D	68~71

(A is the uppermost level and + indicates higher performance)

Material SLD8 merupakan material yang paling sesuai untuk aplikasi penelitian ini dikarenakan beberapa faktor yaitu :

- Tool steel dengan *machinability* paling baik
- Sesuai untuk aplikasi *cold forging*
- Biaya material relative rendah (dibanding HSS)
- Biaya pembuatan tool relative rendah (dibanding HSS)

Heat treatment untuk material SLD8 dibagi menjadi beberapa tahap [19], yaitu :

1. Pemanasan awal (*preheating time*) tahap 1 : *holding time* 50 menit pada suhu 500-550 °C.
Pemanasan tahap 2 : *holding time* 25 menit pada suhu 750-800 °C.
2. Austenisasi : *Holding time* 1 jam pada suhu 1020-1040 °C.
3. *Quenching* : Dengan menggunakan udara
4. *Tempering* : *Holding time* 1 jam pada suhu 520-550 °C untuk kekerasan \geq 60 HRC.

Aktual kekerasan yang didapat berkisar antara 55,1 – 58,6 HRC. Hal ini terjadi karena *range* oven yang tidak bisa menjangkau suhu sampai 1020 °C. Suhu maksimal oven yang bisa didapat hanya sampai 850 °C. Oleh karena itu tahapan penurunan kekerasan (*tempering*) tidak dilakukan karena kekerasan sudah mencapai *range* yang diinginkan yaitu 58-63 HRC.

b. Dimensi Tool (*Tool dimension*)

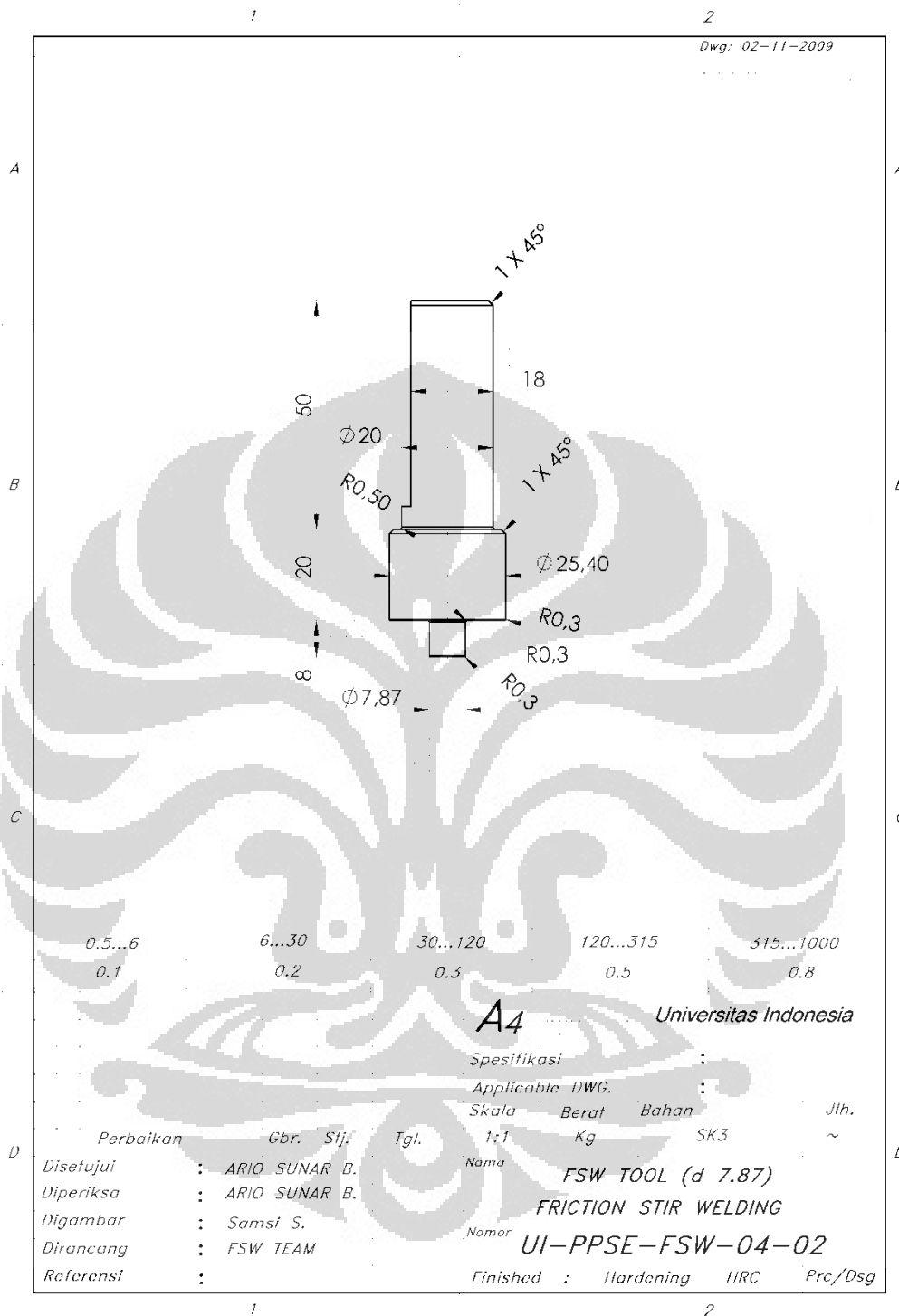
Panjang dari *probe* ditentukan oleh ketebalan benda kerja, kemiringan *tool* dan *clearance* yang diinginkan antara ujung *probe* dengan *backplate*. Diameter pin harus cukup besar untuk menahan *fracture* akibat gaya transversal tapi cukup kecil untuk bisa mengkonsolidasikan material adukan dibawah *shoulder* sebelum material menjadi dingin [6].

Tabel 3.5. Dimensi tool FSW [6]

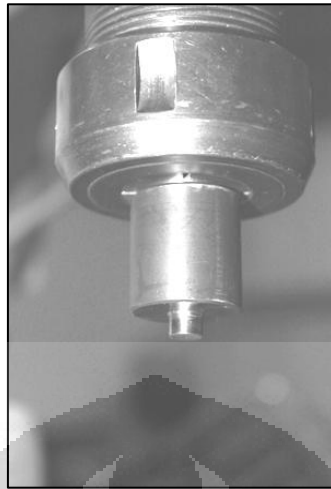
Shoulder diameter		Cylindrical pin diameter		shoulder to pin ratio	Workpiece material and thickness
mm	in	mm	in		
13	0.5	5	0.2	2.6 : 1	6061-T6 Al, 3mm
20-30	0.8 - 1,2	12-Aug	0.3-0.5	2.5 : 1	7050, 2195, 5083, 6.3 mm
23	0.9	8.2	0.32	2.8 : 1	2024-T351, 6.4 mm
20	0.8 - 0.6	6	0.24	3.3 : 1	5083 & 6061, 5.5 mm
12	0.5	4	0.16	3 : 1	1050 Al, 1.8 mm
25.4	1	7.87	0.31	3.22 : 1	7075-T7351, 9.53 mm
23	0.9	8.4	0.33	2.7 : 1	2524-T351, 6.4 mm
20	0.79	4	0.16	5 : 1	6064 Al, 4.5 mm
23	0.9	8.2	0.32	2.8 : 1	2024-T351, 7 mm
10	0.4	3.8	0.15	2.6 : 1	2095 Al, 1.63mm
25	1	9	0.35	2.8 : 1	5251 Al, 5 mm

Berdasarkan pada tabel diatas, pengelasan untuk benda kerja alumunium dengan ketebalan 9.53 (aktual 10 mm) disarankan menggunakan *tool* dengan ukuran *shoulder* diameter 7.87 mm dan diameter *probe* 25.4 mm. Pendekatan ukuran *tool* disini hanya berdasarkan parameter dari tebal benda kerja, karena pada tabel tersebut tidak ada material AC4CH atau ekuivalen dengan alumunium series 3(A.356.0), oleh karena itu percobaan pertama dilakukan dengan *tool* bermaterial SLD8 *heat treated* 58-63 HRC dengan \varnothing *shoulder* 25.4 mm dan \varnothing *probe* 7.87 mm.

Percobaan *tool* dilakukan pada mesin milling universal dengan kecepatan putar 1000 rpm dan kecepatan tempuh terendah konstan (*auto*), namun kondisi aktual mesin yang digunakan tidak cukup kuat untuk menahan gaya (vibrasi) yang terjadi pada *tool* yang bisa menyebabkan kerusakan pada *tool* atau bahkan pada mesin. Oleh karena itu dimensi *tool* diperkecil dengan harapan *downward force* yang terjadi pada *tool* (*shoulder* dan *probe*) bisa diperkecil dan potensi kerusakan pada mesin milling serta perlengkapannya bisa diminimalisir.



Gambar 3.13. Gambar 2D tool FSW d7.87



Gambar 3.14. Tool terpasang pada collet mesin milling

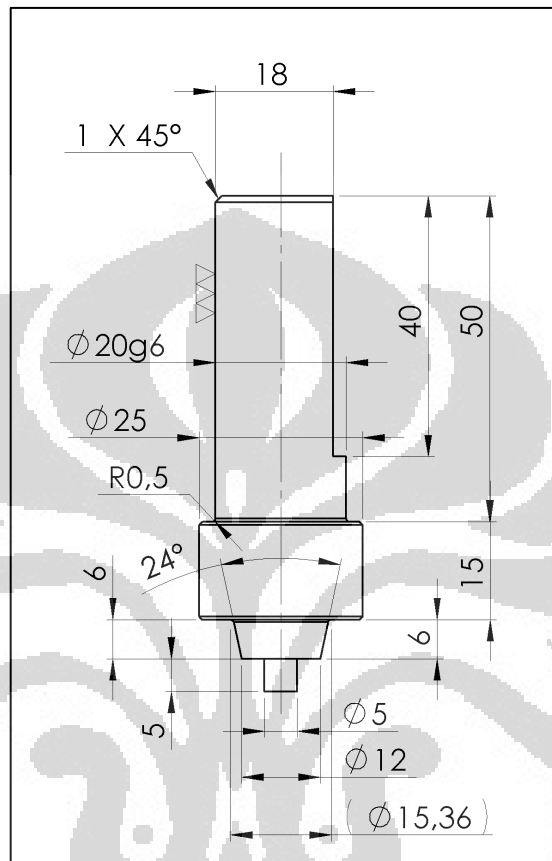


Gambar 3.15. Proses FSW dengan tool probe $\varnothing 7.87$ mm dan shoulder $\varnothing 25.4$ mm



Gambar 3.16. Hasil proses FSW dengan tool probe $\varnothing 7.87$ mm dan shoulder $\varnothing 25.4$ mm

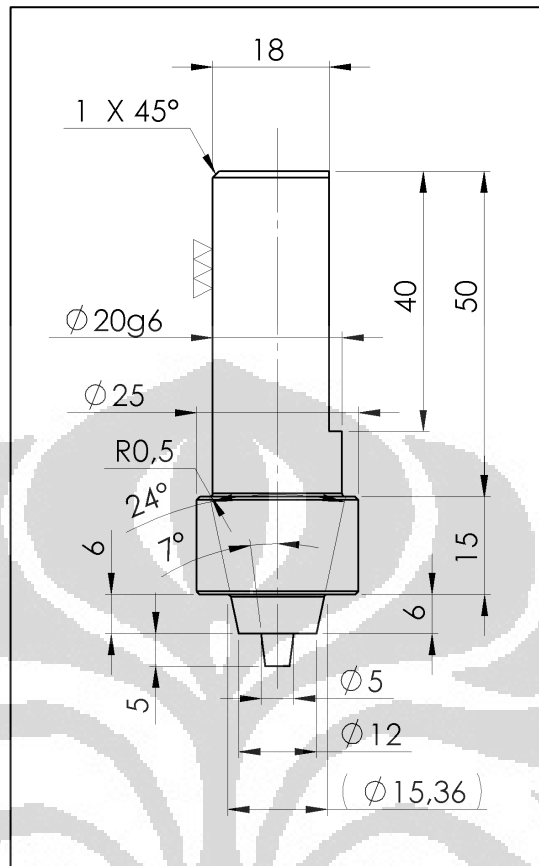
Untuk percobaan yang kedua *tool* menggunakan material SLD8 *heat treated* 58-63 HRC, $\varnothing 12$ mm untuk shoulder, $\varnothing 5$ untuk probe dan 5 mm untuk panjang probe.



Gambar 3.17. Gambar 2D tool FSW dengan Cyl probe $\varnothing 5$ mm



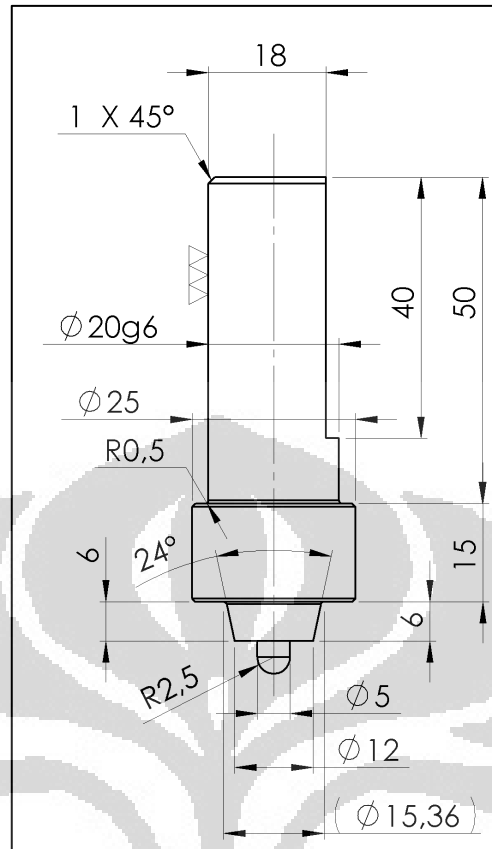
Gambar 3.18. Tool FSW dengan Cyl probe $\varnothing 5$ mm



Gambar 3.19. Gambar 2D tool FSW dengan Tapper probe Ø5 mm



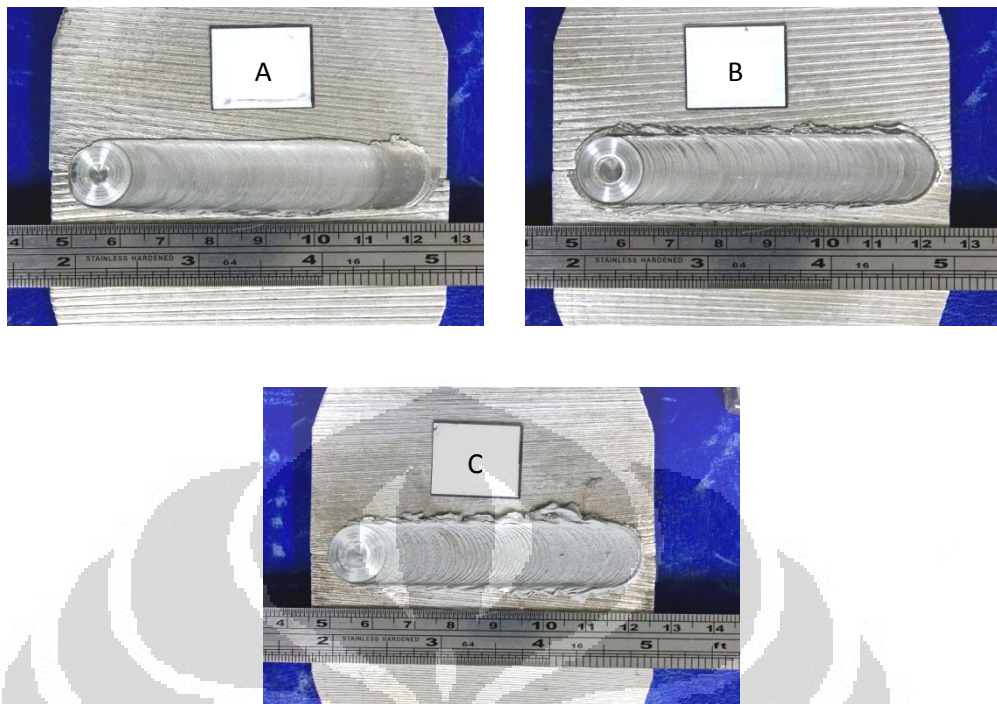
Gambar 3.20. Tool FSW dengan Tapper probe Ø5 mm



Gambar 3.21. Gambar 2D tool FSW dengan Ballnose probe $\varnothing 5$ mm



Gambar 3.22. Tool FSW dengan Ballnose probe $\varnothing 5$ mm

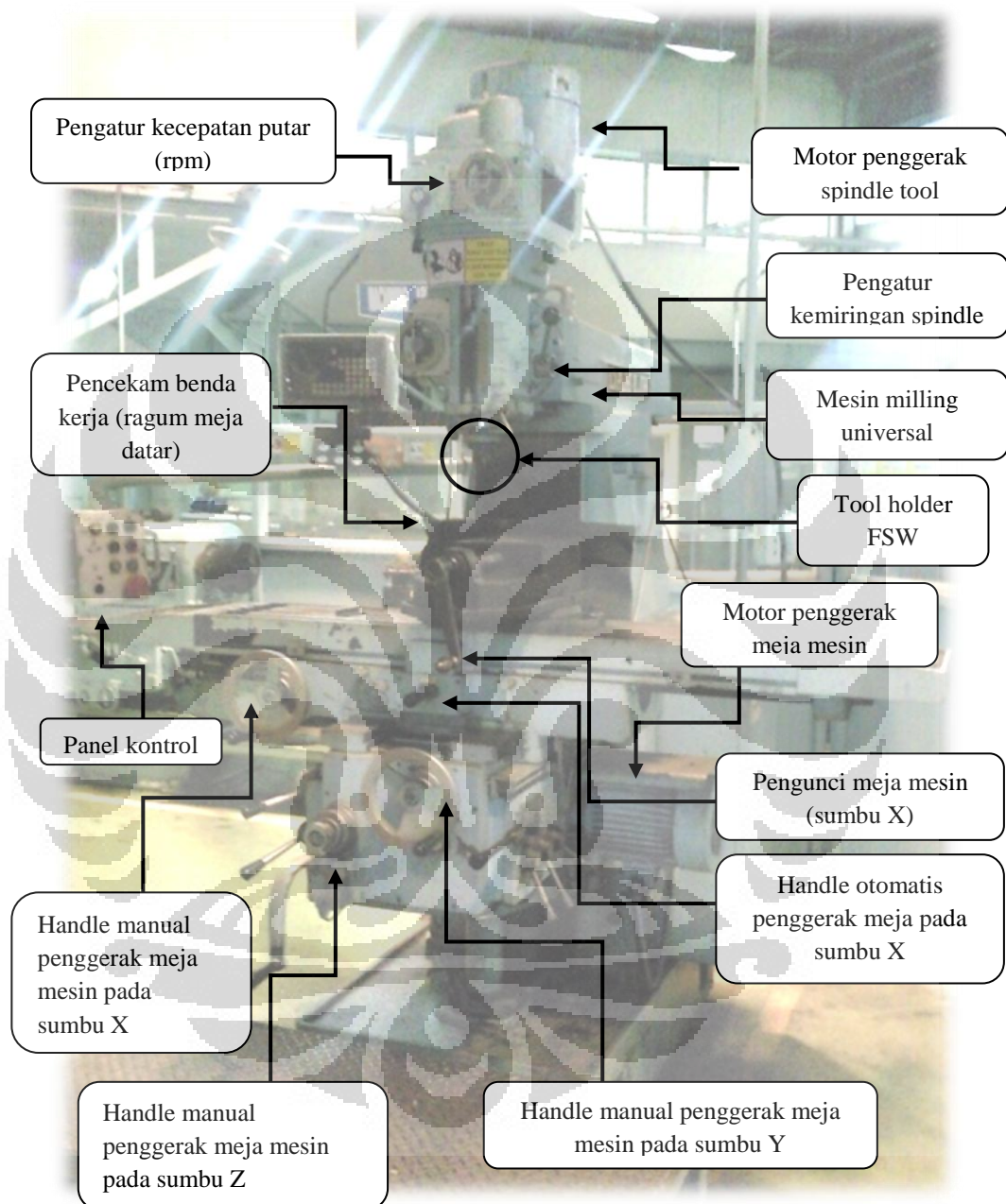


Gambar 3.23. Hasil pengelasan dengan Tool FSW probe $\varnothing 5$ mm, a. Dengan tool taper probe, b. dengan tool cylinder probe, c. dengan tool ballnose probe

3.2.3 Mesin Milling dan Aksesoris

Mesin milling yang digunakan dalam percobaan ini adalah mesin milling vertical Dahlih model DL-GH950 yang merupakan asset dari workshop PT. X. Mesin ini merupakan mesin milling konvensional 3 *axis* yang telah dilengkapi dengan NC dan motor penggerak otomatis untuk meja mesin. Kriteria pemilihan mesin ini adalah karena :

- Mesin ini telah dilengkapi dengan motor penggerak otomatis untuk semua *axis*-nya.
- *Spindle* mesin yang bisa dimiringkan
- Putaran *spindle* yang cukup tinggi (3000 rpm dalam kondisi prima)
- *Tabel area* yang cukup luas
- Aplikasi NC yang memudahkan penunjukan posisi meja mesin.



Gambar 3.24. Mesin dahlih DL-GH950

Tabel 3.5. Spesifikasi mesin milling Dahlih DL-GH950.

Spesifikasi MC milling vertikal Dahlih type DL-GH950	
Year	1987
Serial No	9-50091
made in	Taiwan
X-travel (longitudinal)	950 mm
Y-travel (Transversal)	350 mm
Z travel (vertical)	470 mm
Tabel Length	1350 mm
Tabel Width	310 mm
Tabel Area	1350x310
Daya motor (spindle)	5 hp (3.7 kw)
V	220-330 3 phase
f	50 Hz
n (max)	1400 rpm
I	13.8 A
Max T amb	40°C
Daya motor (Tabel)	3 hp

Alat pencekam benda kerja pada percobaan ini adalah dengan menggunakan ragum. Ragum yang digunakan adalah ragum meja datar dengan lebar pencekam 150 mm dan kedalaman pencekaman 80 mm.

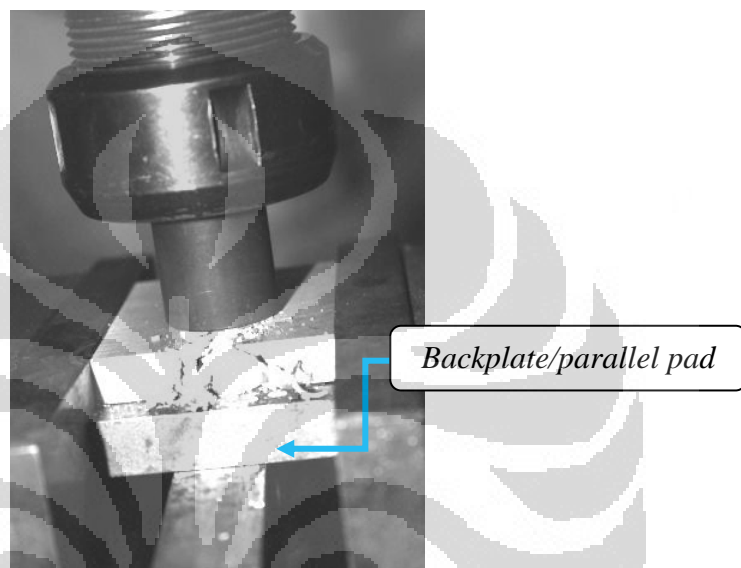


Gambar 3.25. Ragum meja datar

Selain dicekam dengan menggunakan ragum, benda kerja harus ditahan pada bagian bawah karena *downward force* yang terjadi cukup besar dan dapat

mendeformasi permukaan bawah benda kerja. *Backplate* bisa berupa permukaan ragam, bisa permukaan *fixture (support)*, atau berbentuk *parallel pad*.

Pada percobaan ini *parallel pad* digunakan sebagai penahan *downward force* dari *tool* dengan pertimbangan bahwa *parallel pad* mempunyai ukuran yang beragam, mudah didapat (*standard part*), dan mempunyai ukuran kesejajaran yang cukup presisi.



Gambar 3.26. Aplikasi backplate pada FSW

3.3 PERSIAPAN PROSES PENGELASAN

Setelah *specimen*, tool pengelasan dan mesin siap maka langkah selanjutnya adalah persiapan proses pengujian. Persiapan proses pengujian meliputi :

1. Identifikasi no *specimen* (total 54 pcs)
2. Pemasangan alat pencekam (ragum) di mesin milling
3. Penyetingan alat pencekam dengan *dial indicator*.



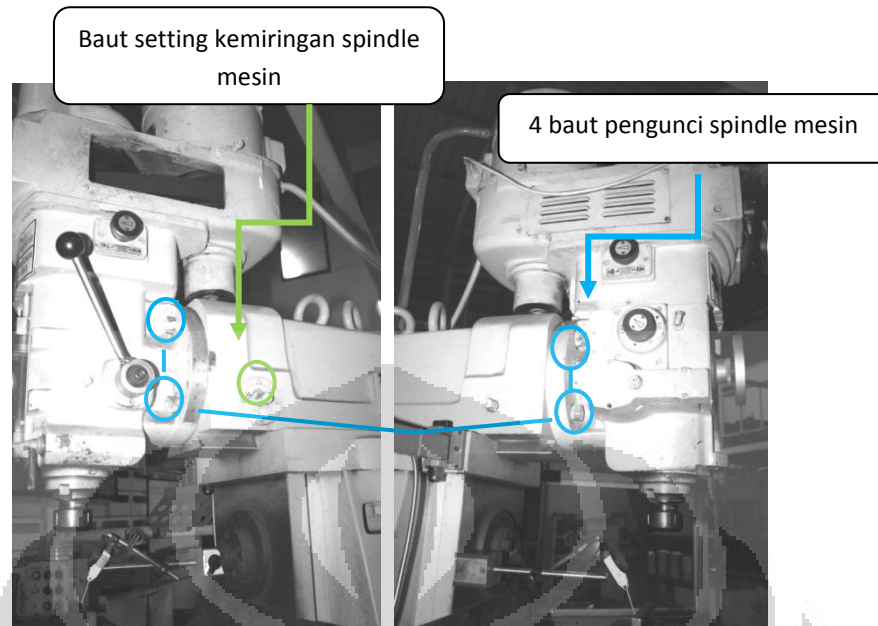
Gambar 3.27. Penyetingan ragum dengan *dial Indikator*

4. Penyetingan parameter mesin (*rotational speed* dan *travel speed*)
Rotational speed disetting pada 1000, 1100 dan 1200 rpm
 sedangkan *travel speed* konstan pada 11.5 mm/menit.



Gambar 3.28. *Handle* penyetingan kecepatan putar (rpm)

5. Setting kemiringan *spindle* mesin (jika pengelasan dilakukan bukan pada settingan 0°).



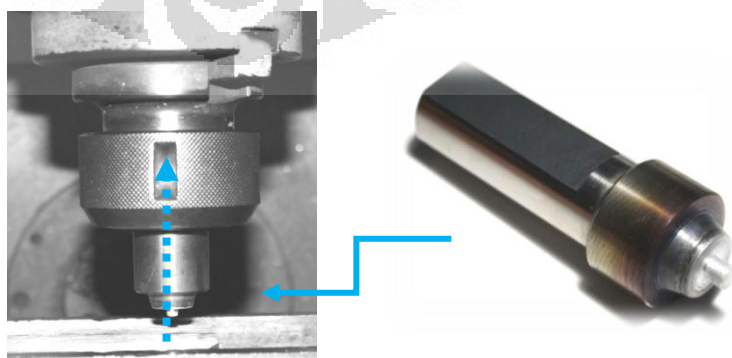
Gambar 3.29. Penyetingan sudut spindle tool

6. Cek fungsi pengunci dari meja (*tabel*) mesin milling, pastikan semua pengunci berfungsi dengan baik.

3.4 PROSES PENGELASAN

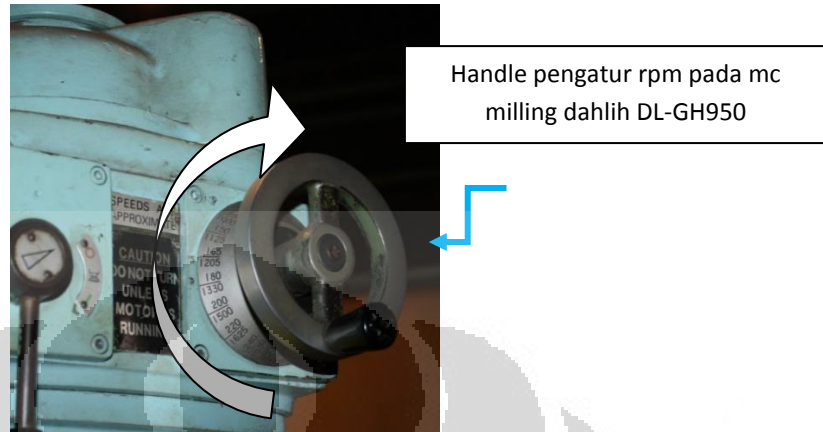
Proses pengelasan bisa dilakukan jika semua alat uji, benda kerja uji dan persiapan pengelasan telah siap. Langkah proses pengelasan FSW adalah :

1. Pasang *tool* pada *collet*, *tool* dipasang setelah *collet* terpasang pada adaptornya untuk meminimalisir kerusakan pada *collet*.



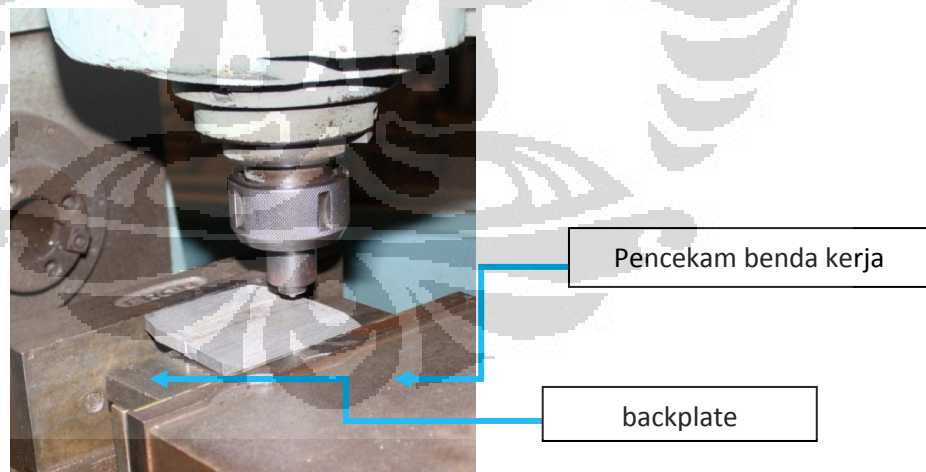
Gambar 3.30. Pemasangan tool pada *collet*.

2. *Setting* rpm mesin pada putaran yang diinginkan (1000, 1100 dan 1200 rpm).



Gambar 3.31. *Handle* pengatur rotational speed pada mesin Dahlih.

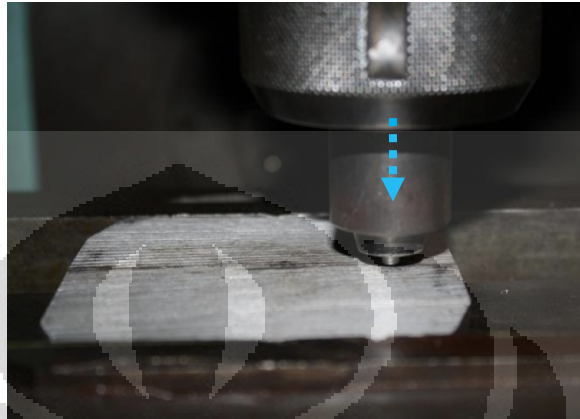
3. Cekam benda kerja pada ragum, siapkan *back plate* untuk menahan benda kerja dan kencangkan ragum dengan maksimal.



Gambar 3.32. Pencekaman benda kerja dengan ragum

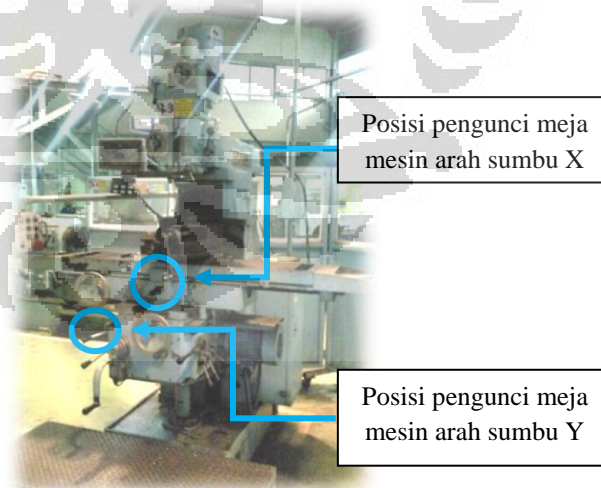
4. Nyalakan mesin pada rpm dan settingan kemiringan *tool* sesuai dengan parameter yang diinginkan.

5. Posisikan FSW *tool* sedekat mungkin dengan *specimen*. Posisi *tool* tidak boleh melewati sisi terluar karena akan menghilangkan *downward force* dari *shoulder tool*.



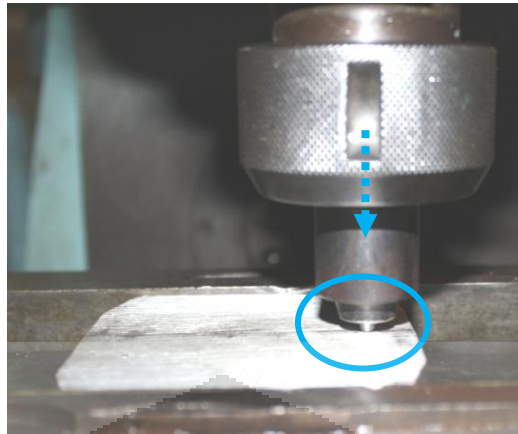
Gambar 3.33. *Positioning tool* terhadap benda kerja

6. Kunci meja mesin milling pada arah X dan Y. Penguncian meja ini bertujuan me jaga terjadi pergeseran benda kerja (meja kerja) akibat adanya *lateral* dan *traverse force*.

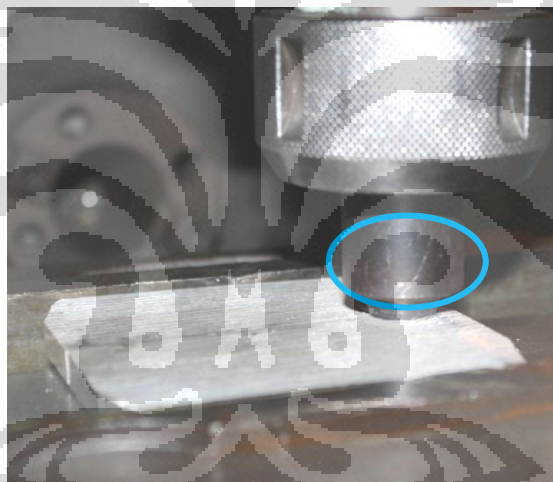


Gambar 3.34. *Handle* pengunci meja kerja di sumbu X dan Y.

7. Penetrasikan *tool* FSW sampai *shoulder* menyentuh benda kerja.



Gambar 3.35. Penetrasi tool terhadap benda kerja



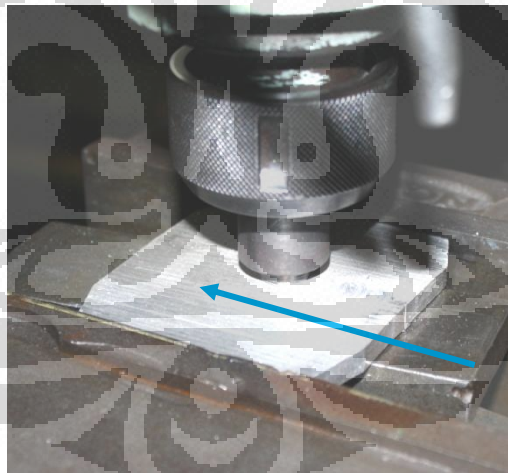
Gambar 3.36. Shoulder tool menyentuh benda kerja

8. Buka kunci meja pada arah X. Kunci *tool* pada arah Z. Penguncian ini bertujuan untuk menahan gaya *downward* dari *tool*.



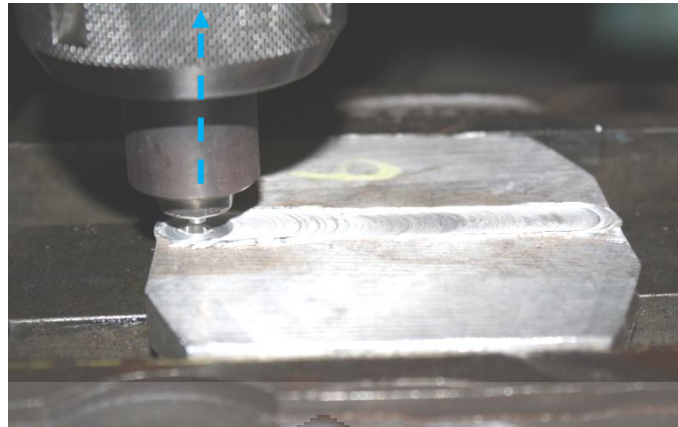
Gambar 3.37. Posisi kunci spindle sumbu Z

9. Gerakan meja kerja pada arah sumbu X dengan *travel speed* konstan 15mm/menit dengan jarak travel 50mm. Pergerakan meja dilakukan dengan metode otomatis untuk menjaga kecepatan meja tetap konstan.



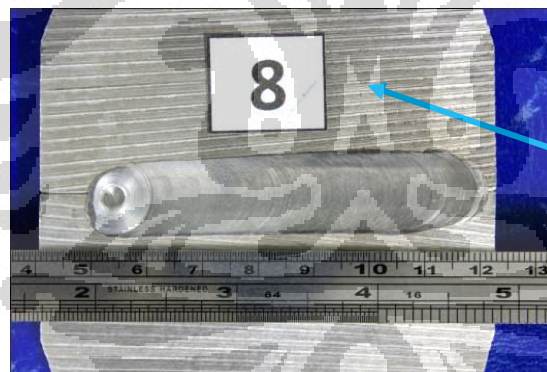
Gambar 3.38. Proses FSW (*travel speed* konstan 15mm/menit)

10. Hentikan pergerakan meja kerja dan tarik tool keluar dari benda kerja (arah sumbu Z).



Gambar 3.39. Tool FSW keluar dan menjauh dari benda kerja (home position)

11. Matikan *spindle* mesin dan posisikan benda kerja terbebas dari FSW tool.
12. Lepas pengekaman benda kerja dari ragum.
13. *Unloading* benda kerja dengan menggunakan tang penjepit dan berikan *marking no specimen*.



Marking dan foto hasil pengelasan

Gambar 3.40. Marking dan foto hasil pengelasan

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

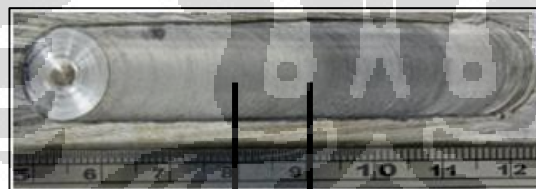
4.1 KARAKTERISASI HASIL PENGUJIAN FSW

Pada percobaan ini ada dua parameter yang akan dianalisis yaitu *flashing* dan kekasaran permukaan. *Flashing* pada permukaan dikarakterisasi dengan proses pengukuran (diameter) pada hasil pengelasan sedangkan kekasaran dikarakterisasikan dengan visual keropos (permukaan tidak tertutup penuh) per tiap 10 mm.



Kasar (terdapat keropos (permukaan tidak tertutup penuh) per 10mm)

Gambar 3.41. Ilustrasi permukaan pengelasan kasar



Halus (tidak terdapat keropos per 10mm)

Gambar 3.42. Ilustrasi permukaan pengelasan halus



Pengukuran diameter flashing


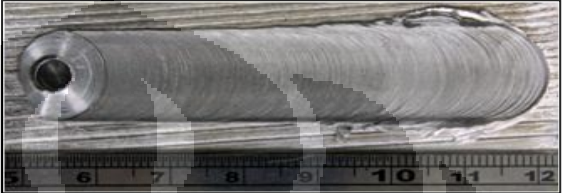

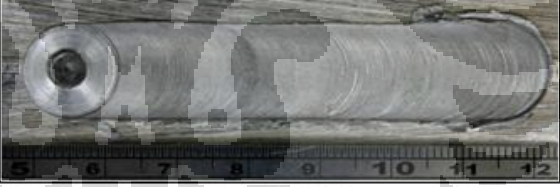


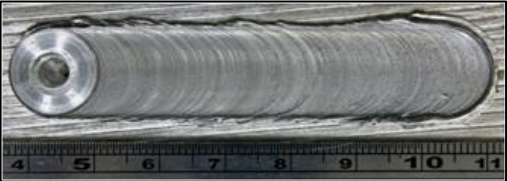
Gambar 3.43. Ilustrasi pengukuran flashing

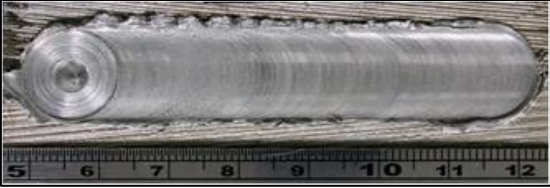
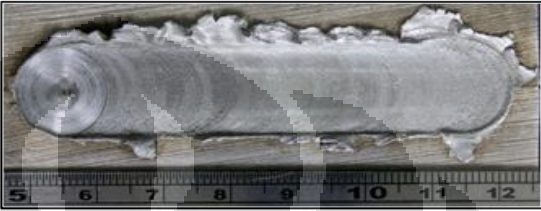
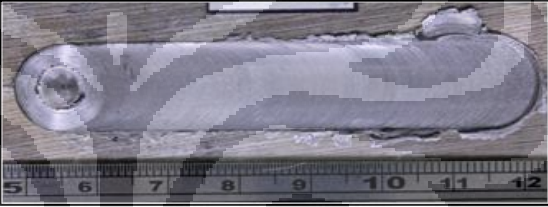

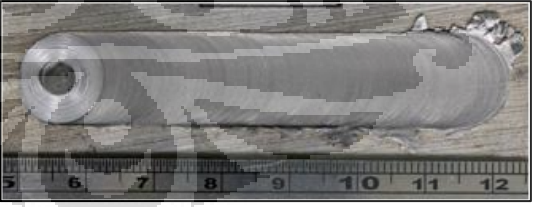

4.2 HASIL PENGUJIAN FSW

Pengujian pertama dilakukan dengan tidak merusak benda kerja (*non destructive test*) yaitu test visual adanya *Flashing* dan Kekasaran permukaan pengelasan. Pembahasan pengujian X-ray, uji tarik, uji kekerasan dan struktur makro akan dibahas pada penelitian selanjutnya.

Tabel 4.1. Tabel hasil pengujian FSW

No	Probe	Tilt	Rpm	Ilustrasi	Diameter flash (mm) & permukaan
1	Tirus	1°	1000		18 Halus
2	Tirus	1°	1100		16 Halus
3	Tirus	1°	1200		18.9 Halus
4	Tirus	2°	1000		14,8 Halus
5	Tirus	2°	1100		13.8 Halus

6	Tirus	2°	1200		16 Halus
7	Lurus	1°	1000		15 Halus
8	Lurus	1°	1100		14.5 Halus
9	Lurus	1°	1200		14.1 Halus
10	Lurus	2°	1000		15.4 Halus
11	Lurus	2°	1100		16 Halus
12	Lurus	2°	1200		16.5 Halus

13	Ballnose	1°	1000		17 Halus
14	Ballnose	1°	1100		19,5 Halus
15	Ballnose	1°	1200		14,4 Halus
16	Ballnose	2°	1000		15 Halus
17	Ballnose	2°	1100		14,4 Halus
18	Ballnose	2°	1200		19,3 Halus

Dalam bentuk matriks hasil pengujian bisa ditunjukkan dalam tabel dibawah ini.

Tabel 4.2. Tabel matrik hasil pengujian FSW

No	Tool Shape	Tool Tilt	rpm	Permukaan weld joint		Ø Flash (mm)
				Halus	Kasar	
1	Tirus	1	1000	o		18
2			1100	o		16
3			1200	o		18,9
4		2	1000	o		14,8
5			1100	o		13,8
6			1200	o		16
7	Cylinder	1	1000	o		15
8			1100	o		14,5
9			1200	o		14,1
10		2	1000	o		15,4
11			1100	o		16
12			1200	o		16,5
13	Ballnose	1	1000	o		17
14			1100	o		19,5
15			1200	o		14,4
16		2	1000	o		15
17			1100	o		14,4
18			1200	o		19,3

Dari data di atas bisa dilihat bahwa seluruh percobaan pengelasan menghasilkan permukaan sambungan (*weld joint surface*) yang halus. Oleh karena itu variasi dari parameter kecepatan putar, kemiringan *tool* dan bentuk dari *probe* tidak berpotensi merubah kekasaran dari permukaan pengelasan (permukaan tertutup penuh per tiap 10 mm).

4.3 ANALISIS VARIANS (ANOVA)

Analisis varians adalah teknik yang memungkinkan kita mengetahui *mean* dari beberapa variable akan bernilai sama atau tidak dengan mengolah data dari sampel masing-masing variabel.

4.3.1 Analisis varians bentuk *probe* terhadap *flashing* pengelasan

Evaluasi variasi bentuk *probe* terhadap *flashing* yang dihasilkan pada proses pengelasan. Evaluasi dilakukan pada 6 kondisi percobaan pada tiap-tiap bentuk *probe*.

Tabel 4.3. Tabel varians bentuk probe terhadap flashing pengelasan

Sample No.	Probe Tirus	Probe Cylinder	Probe Ballnose
1	18	15	17
2	16	14.5	19.5
3	18.9	14.1	14.4
4	14.8	15.4	15
5	13.8	16	14.4
6	16	16.5	19.3

Dengan menggunakan teknik anova, ingin diketahui apakah *flashing* yang terjadi pada tiap bentuk *probe* mempunyai ukuran *mean* yang merata/tidak.

1. Hipotesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

H_1 : tidak seluruh mean populasi sama.

2. $\alpha = 0.05$

3. Menggunakan distribusi F

Jumlah populasi sampel, $k = 3$, maka derajat kebebasan pembilang, $df_{\text{num}} = k-1 = 3-1 = 2$. Banyaknya seluruh anggota sampel, $T = 18$, maka derajat kebebasan penyebut $df_{\text{den}} = T-k = 18-3 = 15$

4. Batas-batas daerah penolakan /batas kritis uji dua ujung (*two-tailed test*). Dari tabel F untuk $\alpha = 0.05$, derajat kebebasan pembilang, $df_{\text{num}} = 2$, dan derajat kebebasan penyebut $df_{\text{den}} = 15$, maka batas kritisnya adalah 3,682.

5. Aturan keputusan :

Tolak H_0 dan terima H_1 jika $R_{U_f} > 3,682$. Jika tidak demikian, terima H_0 .

6. Rasio uji :

Sample no	Probe tirus			Probe Cylinder			Probe Ballnose		
	x_1	$x_1 - \bar{x}_1$	$(x_1 - \bar{x}_1)^2$	x_2	$x_2 - \bar{x}_2$	$(x_2 - \bar{x}_2)^2$	x_3	$x_3 - \bar{x}_3$	$(x_3 - \bar{x}_3)^2$
1	18	1.75	3.0625	15	-0.25	0.0625	17	0.4	0.16
2	16	-0.25	0.0625	14.5	-0.75	0.5625	19.5	2.9	8.41
3	18.9	2.65	7.0225	14.1	-1.15	1.3225	14.4	-2.2	4.84
4	14.8	-1.45	2.1025	15.4	0.15	0.0225	15	-1.6	2.56
5	13.8	-2.45	6.0025	16	0.75	0.5625	14.4	-2.2	4.84
6	16	-0.25	0.0625	16.5	1.25	1.5625	19.3	2.7	7.29
Σ	97.5		18.315	91.5		4.095	99.6		28.1
\bar{x}_i	16.25			15.25			16.6		

$$\bar{X} = \frac{n_1 x_1 + n_2 x_2 + n_3 x_3}{n_1 + n_2 + n_3} = \frac{6(16,25) + 6(15,25) + 6(16,6)}{6+6+6} = 16,033$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{antara}}^2 &= \frac{n_1(x_1 - \bar{X})^2 + n_2(x_2 - \bar{X})^2 + n_3(x_3 - \bar{X})^2}{k-1} \\ &= \frac{6(16,25 - 16,03)^2 + 6(15,25 - 16,03)^2 + 6(16,6 - 16,03)^2}{3-1} \\ &= 2,943 \end{aligned}$$

$$\sigma_{\text{dalam}}^2 = \frac{\sum d_1^2 + \sum d_2^2 + \sum d_3^2}{T-k} = \frac{18,315 + 4,095 + 28,1}{18-3} = 3,367$$

$$R_{U_f} = \frac{\sigma_{\text{antara}}^2}{\sigma_{\text{dalam}}^2} = \frac{2,943}{3,367} = 0,874$$

7. Pengambilan keputusan

Karena $R_{U_f} < 3.86$, maka $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ diterima. Ini berarti *mean* populasi *flashing* pada variasi bentuk I sama (*Flashing* yang dihasilkan akibat variasi bentuk *probe* sama).

4.3.2 Analisis varians kemiringan *tool* terhadap *flashing* pengelasan
Evaluasi variasi bentuk *probe* terhadap *flashing* yang dihasilkan pada proses pengelasan. Evaluasi dilakukan pada 9 kondisi percobaan pada tiap-tiap kemiringan sudut.

Tabel 4.4. Tabel varians kemiringan *tool* terhadap *flashing* pengelasan

Sample no	Sudut Tool 1 derajat			Sudut Tool 2 derajat		
	X_1	$X_1 - \bar{X}_1$	$(X_1 - \bar{X}_1)^2$	X_2	$X_2 - \bar{X}_2$	$(X_2 - \bar{X}_2)^2$
1	18	1.62222	2.631598	14.8	-0.88889	0.790125
2	16	-0.37778	0.142718	13.8	-1.88889	3.567905
3	18.9	2.52222	6.361594	16	0.31111	0.096789
4	15	-1.37778	1.898278	15.4	-0.28889	0.083457
5	14.5	-1.87778	3.526058	16	0.31111	0.096789
6	14.1	-2.27778	5.188282	16.5	0.81111	0.657899
7	17	0.62222	0.387158	15	-0.68889	0.474569
8	19.5	3.12222	9.748258	14.4	-1.28889	1.661237
9	14.4	-1.97778	3.911614	19.3	3.61111	13.04012
Σ	147.4		33.79556	141.2		20.46889
\bar{X}_1	16.37778			15.68889		

Dengan menggunakan teknik anova, ingin diketahui apakah *flashing* yang terjadi pada tiap kemiringan *tool* mempunyai ukuran *mean* yang merata/tidak.

1. Hipotesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

H_1 : tidak seluruh mean populasi sama.

2. $\alpha = 0.05$

3. Menggunakan distribusi F

Jumlah populasi sampel, $k = 2$, maka derajat kebebasan pembilang, $df_{num} = k - 1 = 2 - 1 = 1$. Banyaknya seluruh anggota sampel, $T = 18$, maka derajat kebebasan penyebut $df_{den} = T - k = 18 - 2 = 16$.

4. Batas-batas daerah penolakan /batas kritis uji dua ujung (*two-tailed test*). Dari tabel F untuk $\alpha = 0.05$, derajat kebebasan pembilang, df_{num}

= 1, dan derajat kebebasan penyebut $df_{den} = 16$, maka batas kritisnya adalah 4,494.

5. Aturan keputusan :

Tolak H_0 dan terima H_1 jika $Ru_f > 4,494$. Jika tidak demikian, terima H_0 .

6. Rasio uji :

Sample no	Sudut Tool 1 derajat			Sudut Tool 2 derajat		
	X_1	$X_1 - \underline{X_1}$	$(X_1 - \underline{X_1})^2$	X_2	$X_2 - \underline{X_2}$	$(X_2 - \underline{X_2})^2$
1	18	1.62222	2.631598	14.8	-0.88889	0.790125
2	16	-0.37778	0.142718	13.8	-1.88889	3.567905
3	18.9	2.52222	6.361594	16	0.31111	0.096789
4	15	-1.37778	1.898278	15.4	-0.28889	0.083457
5	14.5	-1.87778	3.526058	16	0.31111	0.096789
6	14.1	-2.27778	5.188282	16.5	0.81111	0.657899
7	17	0.62222	0.387158	15	-0.68889	0.474569
8	19.5	3.12222	9.748258	14.4	-1.28889	1.661237
9	14.4	-1.97778	3.911614	19.3	3.61111	13.04012
Σ	147.4		33.79556	141.2		20.46889
$\underline{X_1}$	16.37778			15.68889		

$$\bar{X} = \frac{n_1 \bar{x}_1 + n_2 \bar{x}_2}{n_1 + n_2} = \frac{9(16,378) + 9(15,689)}{9+9} = 16,033$$

$$\begin{aligned} \sigma_{antara}^2 &= \frac{n_1(x_1 - \bar{X})^2 + n_2(x_2 - \bar{X})^2}{k-1} \\ &= \frac{9(16,378 - 16,03)^2 + 9(15,689 - 16,03)^2}{2-1} \\ &= 2,136 \end{aligned}$$

$$\sigma_{dalam}^2 = \frac{\sum d_1^2 + \sum d_2^2}{T-k} = \frac{33,795 + 20,46}{18-2} = 3,39$$

$$RU_f = \frac{\sigma_{\text{antara}}^2}{\sigma_{\text{dalam}}^2} = \frac{2,136}{3,39} = 0,629$$

7. Pengambilan keputusan

Karena $RU_f < 3.86$, maka $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ diterima. Ini berarti *mean* populasi *flashing* pada variasi kemiringan *tool* sama (*Flashing* yang dihasilkan akibat variasi kemiringan *tool* sama).

4.3.3 Analisis varians kecepatan putar terhadap *flashing* pengelasan

Evaluasi variasi kecepatan putar terhadap *flashing* yang dihasilkan pada proses pengelasan. Evaluasi dilakukan pada 6 kondisi percobaan pada tiap-tiap bentuk *probe*.

Tabel 4.5. Tabel varians kecepatan putar terhadap *flashing* pengelasan

Sample No.	RPM 1000	RPM 1100	RPM 1200
1	18	16	18.9
2	14.8	13.8	16
3	15	14.5	14.1
4	15.4	16	16.5
5	17	19.5	14.4
6	15	14.4	19.3

Dengan menggunakan teknik anova, ingin diketahui apakah *flashing* yang terjadi pada tiap kecepatan putar mempunyai ukuran mean yang merata/tidak.

1. Hipotesis

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$$

H_1 : tidak seluruh mean populasi sama.

2. $\alpha = 0.05$

3. Menggunakan distribusi F

Jumlah populasi sampel, $k = 3$, maka derajat kebebasan pembilang, $df_{\text{num}} = k-1 = 3-1 = 2$. Banyaknya seluruh anggota sampel, $T = 18$, maka derajat kebebasan penyebut $df_{\text{den}} = T-k = 18-3 = 15$

4. Batas-batas daerah penolakan /batas kritis uji dua ujung (*two-tailed test*). Dari tabel F untuk $\alpha = 0.05$, derajat kebebasan pembilang, $df_{\text{num}} = 2$, dan derajat kebebasan penyebut $df_{\text{den}} = 15$, maka batas kritisnya adalah 3,682.
5. Aturan keputusan :
Tolak H_0 dan terima H_1 jika $Ru_f > 3,682$. Jika tidak demikian, terima H_0 .
6. Rasio uji :

Sample no	1000 rpm			1100 rpm			1200 rpm		
	x_1	$x_1 - \bar{x}_1$	$(x_1 - \bar{x}_1)^2$	x_2	$x_2 - \bar{x}_2$	$(x_2 - \bar{x}_2)^2$	x_3	$x_3 - \bar{x}_3$	$(x_3 - \bar{x}_3)^2$
1	18	2.13333	4.5510969	16	0.3	0.09	18.9	2.37	5.6169
2	14.8	-1.06667	1.1377849	13.8	-1.9	3.61	16	-0.53	0.2809
3	15	-0.86667	0.7511169	14.5	-1.2	1.44	14.1	-2.43	5.9049
4	15.4	-0.46667	0.2177809	16	0.3	0.09	16.5	-0.03	0.0009
5	17	1.13333	1.2844369	19.5	3.8	14.44	14.4	-2.13	4.5369
6	15	-0.86667	0.7511169	14.4	-1.3	1.69	19.3	2.77	7.6729
Σ	95.2		8.6933333	94.2		21.36	99.2		24.0134
\bar{x}_1	15.867			15.7			16.533		

$$\bar{X} = \frac{n_1 x_1 + n_2 x_2 + n_3 x_3}{n_1 + n_2 + n_3} = \frac{6(15,867) + 6(15,7) + 6(16,533)}{6+6+6} = 16,033$$

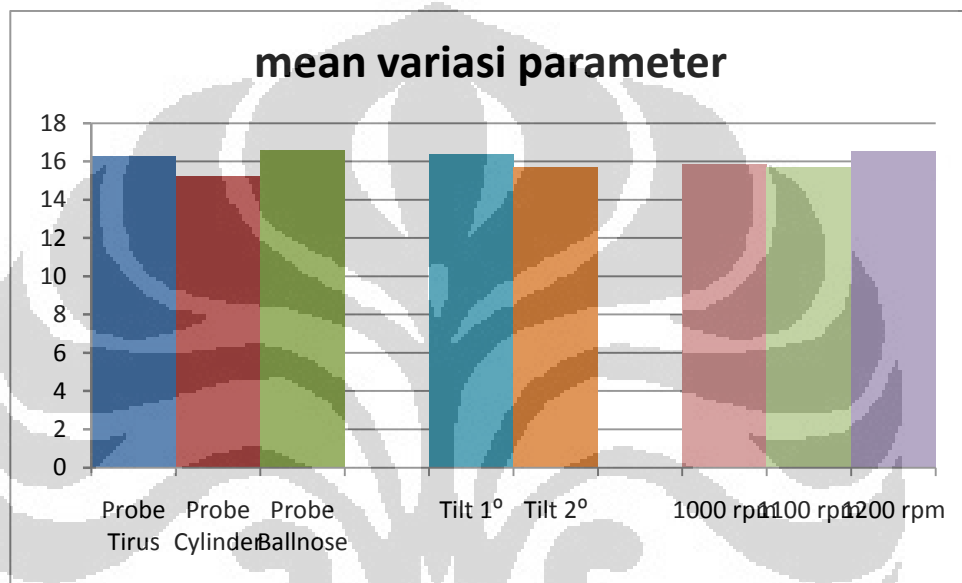
$$\begin{aligned} \sigma_{\text{antara}}^2 &= \frac{n_1(x_1 - \bar{X})^2 + n_2(x_2 - \bar{X})^2 + n_3(x_3 - \bar{X})^2}{k-1} \\ &= \frac{6(15,867 - 16,033)^2 + 6(15,7 - 16,033)^2 + 6(16,533 - 16,033)^2}{3-1} \\ &= 1,167 \end{aligned}$$

$$\sigma_{\text{dalam}}^2 = \frac{\sum d_1^2 + \sum d_2^2 + \sum d_3^2}{T-k} = \frac{8,6933 + 21,36 + 24,0134}{18-3} = 3,604$$

$$RU_f = \frac{\sigma_{antara}^2}{\sigma_{dalam}^2} = \frac{1.167}{3.604} = 0,324$$

7. Pengambilan keputusan

Karena $RU_f < 3.86$, maka $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ diterima. Ini berarti *mean* populasi *flashing* pada variasi kecepatan putar sama (*Flashing* yang dihasilkan akibat variasi kecepatan putar sama).



Gambar 3.44. Grafik mean parameter pengelasan

Dari pengolahan data di atas bisa dilihat jika analisis varian (Anova) dari variasi parameter kecepatan putar, kemiringan tool dan bentuk dari *probe* mempunyai *mean* yang merata atau dengan kata lain variasi dari parameter tersebut tidak berpotensi merubah *flashing* dari permukaan pengelasan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

5.1 KESIMPULAN

- Penelitian ini telah berhasil mengembangkan metode *friction stir welding* (FSW) untuk material AC4CH dengan menggunakan mesin milling universal Dahlih DL-GH950
- Pengembangan *tool friction stir welding* (FSW) menggunakan material tool steel SLD8 (58-63 HRC) dengan variasi bentuk *probe* silinder, tirus dan *ballnose*.
- Variasi parameter kecepatan putar, kemiringan tool dan bentuk dari probe mempunyai *mean* yang merata atau dengan kata lain variasi dari parameter tersebut tidak berpotensi merubah *flashing* dan kekasaran dari permukaan pengelasan.

5.2 SARAN PENELITIAN LEBIH LANJUT

- Penelitian difokuskan pada salah satu parameter (tool design, kecepatan putar, kemiringan tool) dengan jumlah benda uji yang cukup banyak untuk mengetahui variasi hasil pengelasan yang lebih luas.
- Pembuatan fixture (locator dan clamber) khusus untuk pengujian proses FSW yang juga bisa dikembangkan sebagai support untuk pemasangan load cell.
- Adanya pengembangan mengenai lapisan permukaan (coating surface) pada tool FSW untuk menghindari lengketnya material pada tool.
- Menggunakan mesin milling dengan transmisi gearbox untuk meminimalisir penurunan rpm pada spindle ketika proses berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

1. C.J. Dawes, W. Thomas, *TWI Bull*, Vol 6, Nov/Dec 1995, p124.
2. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, et all, Patent 9125978.8, Dec 1991.
3. Jarot Wijayanto, Aghda Anelis, *Pengaruh feed rate terhadap sifat mekanik padapengelasan friction stir welding alumunium 6110*, jurnal kompetensi teknik Vol. 2, No. 1, Nov 2010.
4. Khaled, Terry, *An outsider looks at friction stir welding*, ANM-112N-05-06 juli 2005.
5. TWI web site. www.twi.co.uk (12 mei 2011).
6. Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, *Friction stir welding and processing*, editors,p 1-5, 2007.
7. C. J. Dawes and W. M. Thomas, *First International Symposium on Friction Stir Welding (Session 7)*, Thousand Oaks, California, USA, 14-16 June 1999.
8. L. Ekman, A. Norlin and J. Backlund: *Second International Symposium on Friction Stir Welding (session 1)*, Gothenburg, Sweden, 26-28 June 2000.
9. M. J. Brooker, A. J. M. van Deudekom, S. W. Kallee and P. D. Sketchley: *Second International Symposium on Friction Stir Welding (session 9)*, Gothenburg, Sweden, 26-28 June 2000.
10. R. Talwar, D. Bolser, R. Lederich and J. Baumann: *Second International Symposium on Friction Stir Welding (session 9)*, Gothenburg, Sweden, 26-28 June 2000.
11. K. J. Colligan: *Welding Journal*, 1999, vol. 78(7), pp. 229s-237s.
12. S. Hirano, K. Okamoto, K. Aota, H. Okamura, Y. Aono and T. Odakura, *Third International Symposium on Friction Stir Welding (Session 1)*, Kobe, Japan, 27-28 September 2001.
13. K. J. Colligan, P. J. Konkol, J. J. Fisher, and J. R. Pickens, *Welding Journal*, 2003, vol. 82 (3), pp. 34-40.

14. Arifin, Bustanul; Suharno, Bambang; Harjanto, Sri, *Karakter Alumunium Casting*, Departemen Teknik Metalurgi, Universitas Indonesia, Depok.
15. www.gwp-ag.com (18 mei 2011).
16. Harinaldi. (2005), *Prinsip-prinsip statistic untuk teknik dan sains*
17. www.directindustry.com (18 mei 2011).
18. www.Uniplasco.indonetwork.co.id (18 mei 2011).
19. Japan Industrial Standard (JIS)
20. YSS cold working tool steel catalogue

