

PENGARUH VARIASI DIAMETER *SHOULDER* DAN *WELDING SPEED* TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN HASIL *FRICITION STIR WELDING* PADA ALUMINIUM

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**BAHAR SUDRAJAT
NIM. 115060209111005-62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN MESIN
MALANG**

2014

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH VARIASI DIAMETER *SHOULDER* DAN *WELDING SPEED*
TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN HASIL *FRICTION STIR*
WELDING PADA ALUMINIUM**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

**BAHAR SUDRAJAT
NIM. 115060209111005-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Ir. Endi Sutikno, MT.
NIP. 19590411 198710 1 001**

**Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, ST, M.Eng.
NIP. 19750710 199903 1 004**

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH VARIASI DIAMETER *SHOULDER* DAN *WELDING SPEED*
TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN HASIL *FRICTION STIR*
WELDING PADA ALUMINIUM**

SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

**BAHAR SUDRAJAT
NIM. 115060209111005**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 3 Februari 2014

MAJELIS PENGUJI

Skripsi I

**Dr.Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met
NIP. 19551117 198601 1 001**

Skripsi II

**Ir. Erwin Sulistyo, MT
NIP. 19661213 199802 1 001**

Skripsi III

**Khairul Anam, ST., MSc.
NIK. 861127 06 3 1 0032**

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

**Dr.Eng. Nurkholish Hamidi, ST., M.Eng.
NIP. 19740121 199903 1 001**

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas ridho dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **"Pengaruh Variasi Diameter *Shoulder* dan *Welding Speed* Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Hasil *Friction Stir Welding* Pada Aluminium "** dengan baik.

Penulis merasa bahwa dalam menyusun laporan ini masih menemui beberapa kesulitan dan hambatan, disamping itu juga menyadari bahwa penulisan laporan ini masih jauh dari sempurna dan masih banyak kekurangan-kekurangan lainnya, maka dari itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari semua pihak.

Dalam menyelesaikan skripsi ini, banyak hambatan dan rintangan yang penulis alami namun berkat bantuan dari semua pihak skripsi ini dapat terselesaikan, oleh karena itu pada kesempatan ini diperkenankan penulis untuk mengutarakan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

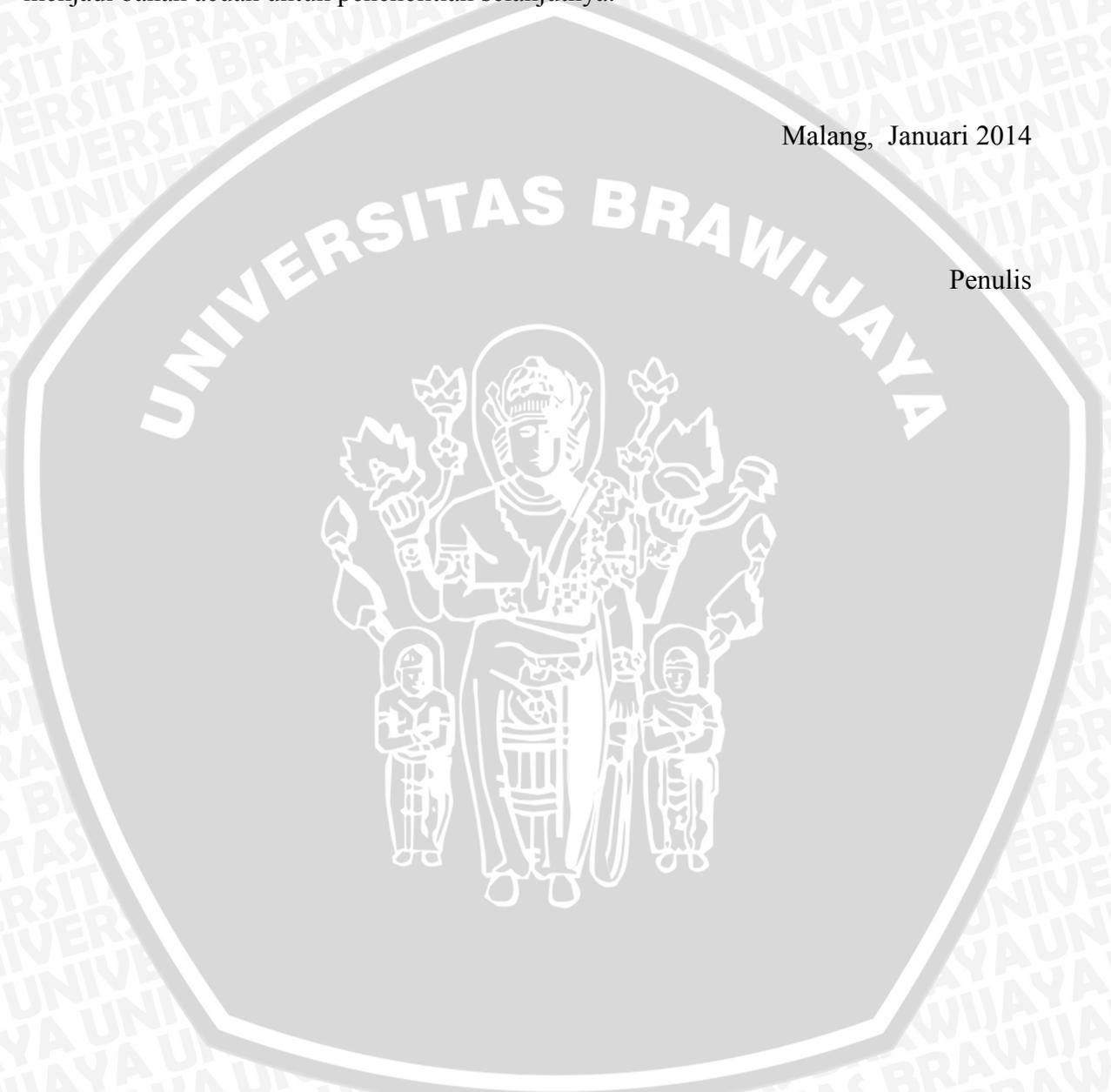
1. Bapak Nurkholish, ST, M.Eng., Dr.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
2. Purnami, ST., MT selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, MSc. Selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Produksi Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Ir. Endi Sutikno, MT. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan segala bimbingan, pengarahan, motivasi, dan masukan .
5. Bapak Yudy Surya Irawan, ST, M.Eng., Dr.Eng selaku Dosen Pembimbing II yang dengan sabar memberikan bimbingan dan arahan selama proses penulisan tugas akhir ini
6. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang yang bersedia berbagi ilmunya. Khususnya Mas Arif Hadi Wiyono selaku Laboran Laboratorium Proses Produksi I Universitas Brawijaya Malang dan Bapak Suhastomo selaku Laboran Laboratorium Pengujian Bahan yang telah membantu pelaksanaan penelitian.
7. Teman-teman Jurusan Teknik Mesin terutama Ary Wediyanto, Andika Bustari, Rendy Setio.P , Teddy Andi.P, Mochamad Riky.P dan Marhady Budi W.

8. Terakhir dan orang yang paling berpengaruh dalam hidup saya yaitu kedua orang tua tercinta, Bapak Bahauddin dan Ibu Hamdiah terima kasih atas curahan kasih sayang, doa, dan dorongan baik moril maupun materil kepada penulis selama ini.

Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca sekaligus dapat menjadi bahan acuan untuk penelitian selanjutnya.

Malang, Januari 2014

Penulis



DAFTAR ISI

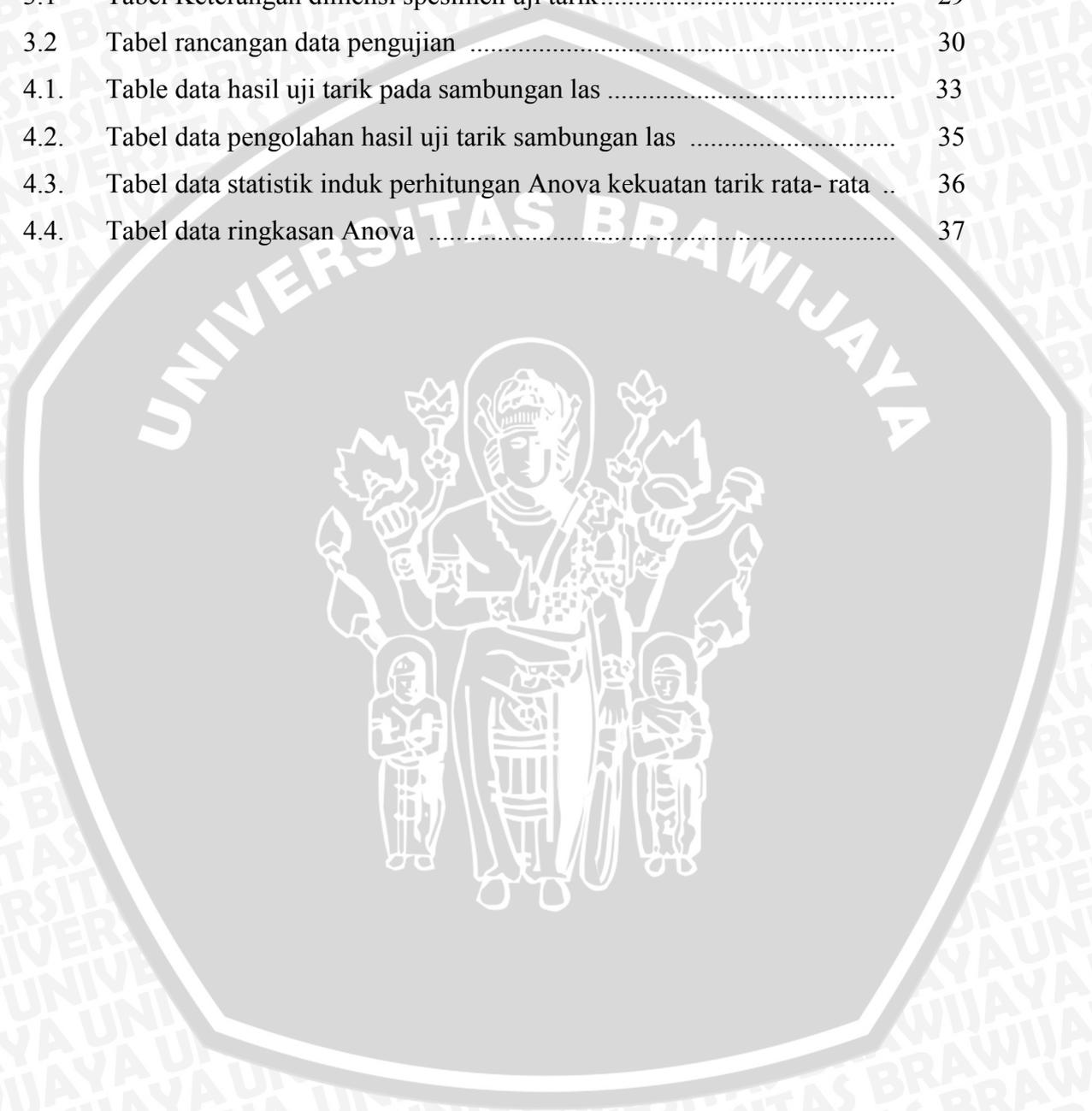
	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1. Penelitian sebelumnya	4
2.2. Pengertian pengelasan	4
2.3. Siklus thermal las	8
2.4. Perencanaan <i>Tool</i>	9
2.5. Energi <i>Input</i>	11
2.6. Aluminium	13
2.7. Pengujian Tarik	18
2.8. Anova dua Jalur	19
BAB III METODE PENELITIAN	23
3.1. Tempat dan waktu penelitian	23
3.2. Variabel penelitian	23
3.2.1 Variabel bebas	23
3.2.3 Variabel terikat	23
3.2.3 Variabel terkontrol	24
3.3. Peralatan Penelitian	24



3.4	Bahan penelitian	24
3.5	Spesifikasi peralatan penelitian	25
3.6	Prosedur penelitian	27
3.6.1	Proses persiapan pengelasan benda	27
3.6.2	Proses pengelasan benda	28
3.6.3	Proses pengujian tarik	29
3.7	Rancangan penelitian	30
3.7.1	Analisa statistik	30
3.7.2	Analisa grafik	31
3.8	Diagram Alir	32
BAB IV PEMBAHASAN		33
4.1	Data Hasil Penelitian	33
4.1.1	Data kekuatan tarik Aluminium hasil pengelasan	34
4.2	Pengolahan data hasil penelitian	35
4.2.1	Menghitung <i>Ultimate tensil strength</i>	35
4.2.2	Anova	36
4.3	Pembahasan	39
4.3.1	Hubungan antara diameter <i>shoulder</i> terhadap kekuatan tarik sambungan las	39
4.3.2	Hubungan antara <i>welding speed</i> terhadap kekuatan tarik sambungan las	41
BAB V PENUTUP		43
5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran	43
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1. Tabel Daftar statistik induk	20
2.2. Tabel ringkasan Anova	22
3.1 Tabel Keterangan dimensi spesimen uji tarik.....	29
3.2 Tabel rancangan data pengujian	30
4.1. Table data hasil uji tarik pada sambungan las	33
4.2. Tabel data pengolahan hasil uji tarik sambungan las	35
4.3. Tabel data statistik induk perhitungan Anova kekuatan tarik rata- rata ...	36
4.4. Tabel data ringkasan Anova	37



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1	Klasifikasi pengelasan 5
2.2	Prinsip dasar proses <i>Friction stir welding</i> 6
2.3	Macam konfigurasi sambungan 7
2.4	Variasi region pada potongan material FSW 8
2.5	Konfigurasi <i>shoulder</i> dan <i>pin</i> 10
2.6	Diagram fasa paduan Al-Si 16
2.7	Kurva tegangan regangan 18
3.1.	Spesimen hasil pengelasan..... 25
3.2.	Mesin uji tarik 26
3.3.	Mesin <i>milling</i> Universal standar 27
3.4.	Standar benda uji No 13 JIS 29
3.5.	Grafik hubungan antara <i>welding speed</i> dan diameter <i>shoulder</i> Terhadap kekuatan tarik 31
4.1	Grafik hubungan antara diameter <i>shoulder</i> terhadap kekuatan tarik sambungan las Aluminium..... 39
4.2	Grafik hubungan antara <i>Welding speed</i> terhadap kekuatan tarik sambungan las Aluminium..... 41

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Hasil pengelasan
- Lampiran 2 Foto Mikro
- Lampiran 3 Hasil EDX (komposisi)
- Lampiran 4 Dokumentasi Kegiatan penelitian.

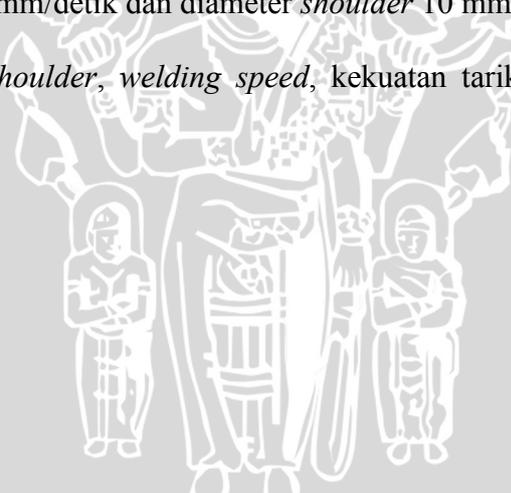


RINGKASAN

Bahar Sudrajat, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2014, *Pengaruh variasi diameter shoulder dan welding speed terhadap kekuatan tarik sambunga hasil friction stir welding*, Dosen Pembimbing : Endi Sutikno dan Yudy Surya Irawan.

Friction stir welding (FSW) merupakan salah satu teknik pengelasan baru yang diciptakan oleh *The Welding Institute* (TWI), Cambridge, Inggris. FSW termasuk *unconsumable solid-state joining process* yang berarti pengelasan tanpa bahan tambah dan suhu kerjanya tidak melewati titik lebur benda kerja. Prinsip kerja dari FSW adalah memanfaatkan gesekan dari tool yang berputar dan bergerak pada alur pengelasan dengan benda kerja yang diam. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari pengaruh parameter – parameter utama yang ada pada proses pengelasan FSW (*friction stir welding*) terhadap kekuatan tarik sambungan las Aluminium, pada penelitian kali ini pengelasan akan dilakukan dengan bantuan mesin milling standar, dan tipe sambungan yang digunakan adalah *butt joint*. Pada penelitian kali ini melibatkan tiga parameter utama, dimana dua parameter yaitu diameter *shoulder* dan *welding speed* divariasikan, dan kecepatan putar dijaga konstan. Diameter *shoulder* yang digunakan (8; 10; dan 12mm) sedangkan *welding speed* (42; 55; dan 74 mm/menit) dan rpm dijaga konstan pada 2257. Dari penelitian kali ini tegangan tarik maksimum yang diperoleh adalah 114,22 MPa atau 77.17 % dari kekuatan tarik maksimum logam induk yang kami gunakan, tegangan tarik maksimum yang diperoleh merupakan hasil pengelasan pada kondisi dimana *welding speed* 74 mm/detik dan diameter *shoulder* 10 mm.

Kata Kunci: Diameter *shoulder*, *welding speed*, kekuatan tarik, *friction stir welding*, aluminium.



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses manufaktur dewasa ini menunjukkan perkembangan yang sangat pesat, hal ini memicu persaingan yang ketat dalam proses penyediaan produk – produk manufaktur. Perkembangan ini memaksa para penggerak industri untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas agar dapat mengakomodir semua tuntutan. Proses pengelasan banyak diaplikasikan dalam industri manufaktur khususnya dalam penyambungan karena prosesnya lebih sederhana dan hanya memerlukan biaya yang murah.

Aluminium merupakan salah satu material yang sering digunakan dalam industri manufaktur karena sifatnya yang ringan dan lebih tahan terhadap korosi dibandingkan besi atau baja, akan tetapi karena memiliki titik lebur yang rendah menyebabkan proses pengelasannya sedikit sulit dibandingkan baja karena untuk memanaskan dan mencairkan sebagian dari material tersebut sangatlah sulit karena itu aluminium digolongkan logam dengan sifat mampu las yang buruk. Akan tetapi ditemukan metode baru dalam proses pengelasan aluminium yang dapat menghasilkan lasan yang lebih baik, yaitu pengelasan FSW (*friction stir welding*).

FSW (*Friction Stir Welding*) merupakan metode pengelasan yang diciptakan dan dikembangkan oleh *The Welding Institute (TWI)* pada tahun 1991 yang pada awal penelitiannya diaplikasikan untuk material aluminium paduan. 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 juga 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 atau kilatan saat proses pengelasan berlangsung.

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.

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. Sedangkan parameter yang lain seperti *welding speed* dan diameter *shoulder* sangat sedikit dipublikasikan. Karena itu kami akan melakukan penelitian pengaruh kedua parameter tersebut pada proses FSW.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, dimana beberapa perubahan parameter pada proses FSW akan menghasilkan kualitas produk lasan yang bervariasi, maka peneliti akan mempelajari dan membandingkan bagaimana pengaruh parameter – parameter tersebut terhadap hasil pengelasan, sehingga rumusan masalah dari penelitian kami ini adalah Bagaimana pengaruh diameter *Shoulder* dan *welding speed* terhadap kekuatan tarik hasil *friction stir welding* pada Aluminium.

1.3 Batasan Masalah

Dalam melakukan penelitian ini dilakukan batasan yaitu

1. Variasi ukuran diameter *shoulder tool* FSW yaitu 8 ; 10 ; dan 12 mm.
2. Material *tool* yang digunakan adalah HSS dengan diameter *shoulder* 8 mm, diameter *probe* 5 mm dan panjang *probe* 2,5 mm, *shoulder* 10 mm, diameter *probe* 5 mm dan panjang *probe* 2,5 mm dan *shoulder* 12 mm, diameter *probe* 5 mm dan panjang *probe* 2,5 mm.
3. Tipe sambungan las *butt join*.
4. Mesin yang digunakan untuk pengelasan yaitu mesin *milling* universal Standar.
5. Kecepatan tempuh (*travel speed*) konstan 42, 55, 74 mm/menit.
6. Bahan yang digunakan adalah plat Aluminium dengan tebal 3 mm.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan kekuatan tarik yang optimal pada sambungan Aluminium dengan variasi diameter *Shoulder* dan *welding speed* pada pengelasan FSW (*friction stir welding*).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan pengaturan variasi *welding speed* dan variasi diameter *shoulder* yang optimal.
2. Sebagai literatur bagi penelitian selanjutnya dalam rangka pengembangan teknologi khususnya bidang pengelasan.
3. Mampu mengaplikasikan teori yang telah diterima dalam bangku perkuliahan khususnya dalam teknik pengelasan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian sebelumnya

Penelitian sebelumnya pernah dilakukan oleh Patil dan Soman (2010) tentang pengaruh *tool pin profil* dan kecepatan pengelesan pada aluminium AA6082-O pada sambungan hasil *friction stir welding* dengan tipe sambungan *butt joint* dimana diperoleh hasil bahwa, *pin profil* dan kecepatan pengelasan tidak berpengaruh besar pada tampilan luar dari hasil pengelesan akan tetapi berpengaruh besar pada struktur sambungan dan sifat – sifat dari material yang akan dilas. Dari penelitian yang mereka lakukan diperoleh kesimpulan bahwa *profil pin* dengan bentuk ulir dan dengan kecepatan pengelasan 70 mm/min mencapai kekuatan tarik tertinggi yaitu 92,30 % dari kekuatan *raw material*.

Megantoro (2011) yang melakukan penelitian tentang pengaruh perbedaan *tool shoulder* terhadap sifat mekanis dan biaya pengelasan pada Aluminium 5083 dengan metode *friction stir welding*, dari penelitian yang dilakukan dengan variasi diameter *shoulder* 16, 18, dan 20 mm hasil yang dicapai dari penelitian tersebut adalah sebagai berikut :

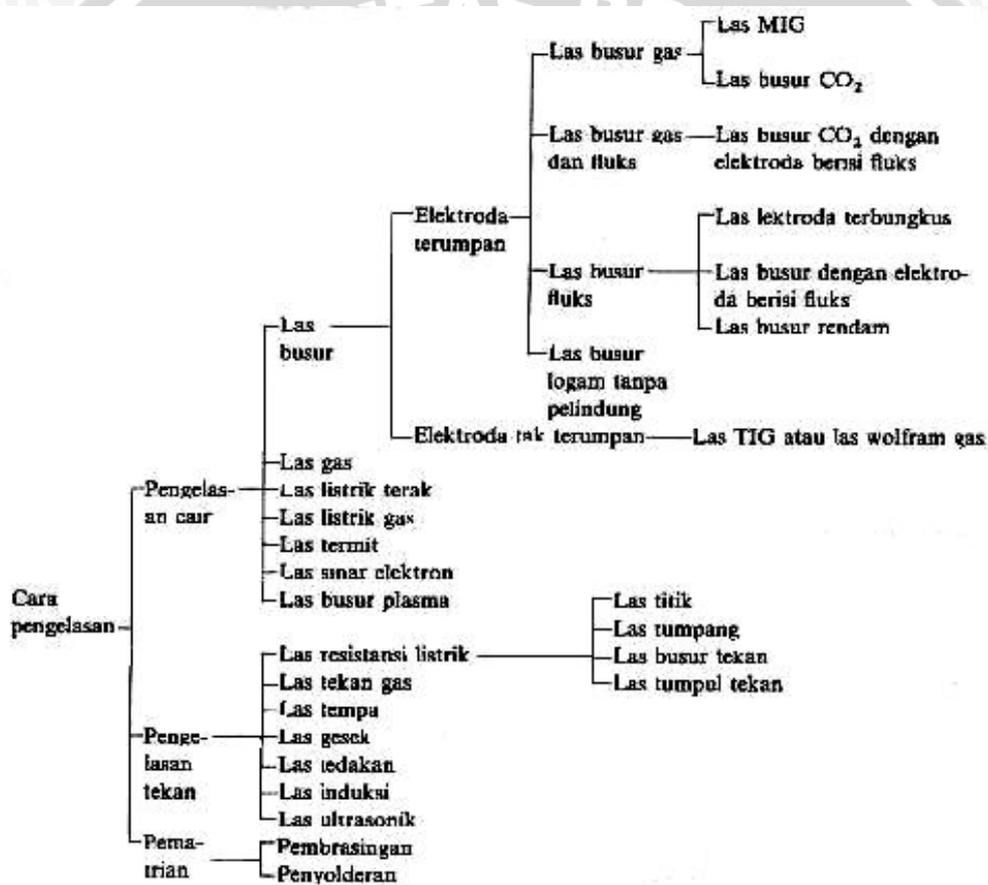
1. Pada diameter *shoulder* 16 mm diperoleh kekuatan tariknya sebesar 168,5 MPa dan sudut tekuk 47°.
2. Pada diameter *shoulder* 18 mm diperoleh kekuatan tariknya sebesar 226,07 MPa dan sudut tekuk 80°.
3. Pada diameter *shoulder* 20 mm diperoleh kekuatan tariknya sebesar 128,44 MPa dan sudut tekuk 67,5°.

Dari penelitian yang dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa *probe* dengan diameter *shoulder* 18 mm menghasilkan lasan dengan kualitas paling baik yaitu dengan kuat tarik 226 MPa sudut tekuk sampai 80° dan kekerasan sebesar 133 pada daerah HAZ. Dan untuk biaya pengelasan metode FSW jauh lebih murah dibandingkan dengan GTAW dan GMAW.

2.2 Pengertian pengelasan.

Berdasarkan pengertian dari *Deutche Industrie Normen* (DIN), las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan cair. Penggolongan jenis las menurut cara kerjanya dibagi dalam:

1. Pengelasan cair.
Cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar.
2. Pengelasan tekan.
Pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga menjadi satu.
3. Pematrian.
Pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah.

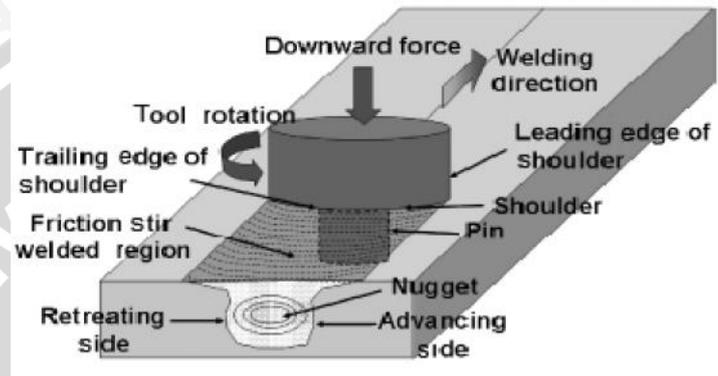


Gambar 2.1 Klasifikasi Pengelasan
Sumber: Wiryosumarto, 1994: 8

- **Las FSW (*Friction Stir Welding*)**

Friction stir welding (FSW) merupakan salah satu teknik pengelasan baru yang diciptakan oleh *The Welding Institute* (TWI), Cambridge, Inggris. FSW termasuk *unconsumable solid-state joining process* 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. Mesin las FSW (*Friction stir welding*) yang pertama kali di buat dan dijual adalah produk ESAB *welding and cutting product* pada pabrik mereka yang berada di laxa, swedia. Pengembangan proses ini berubah secara signifikan dari gerak Putar konvensional dan gesekan linear yang saling berbalasan, menjadi penyambungan dua buah material dengan media gesek (perkakas las).



Gambar 2.2 Prinsip dasar proses *friction stir welding*
Sumber : Mishra, 2007 : 1

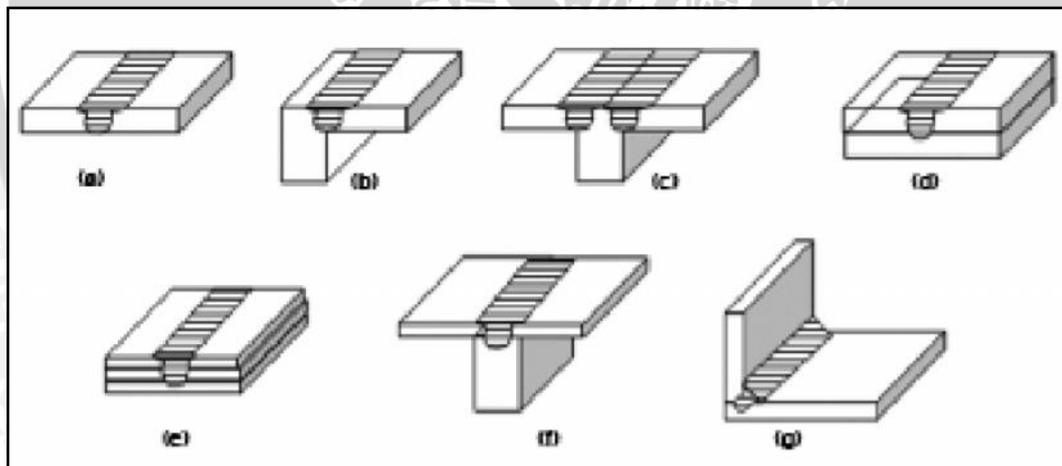
Dalam FSW, *tool* pengelasan dengan atau tanpa *profil* pada *probe* berputar dan bergerak dengan kecepatan konstan sepanjang jalur sambungan antara dua material yang dilas. Benda kerja harus dicekam dengan kuat pada *fixture* atau ragum untuk mempertahankan posisinya akibat gaya yang terjadi pada waktu pengelasan. Panjang dari *probe* harus lebih pendek dan dari pada tebal benda kerja dan *shoulder* dari *tool* harus bersentuhan dengan permukaan benda kerja.

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 inilah yang memungkinkan *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 mengkondisikan logam las.

Keuntungan-keuntungan dari FSW :

- Tidak terjadi pelelehan selama pengelasan.
- Bisa mengelas semua jenis aluminium.
- Kekuatan las lebih baik.
- Tidak memerlukan bahan pengisi.
- Tidak memerlukan gas pelindung.
- *Tool welding* dapat digunakan berulang-ulang.
- Ramah lingkungan (*low flame*).
- Energi yang dibutuhkan untuk pengelasan lebih rendah dari *fusion welding*.

FSW bisa digunakan untuk mengelas material aluminium (*casting* maupun *alloy*) baik satu atau berbeda series, baja, titanium, tembaga, magnesium *alloy*, logam paduan dan komposit. 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 2.3 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*

Sumber : Mishra, 2007 : 3

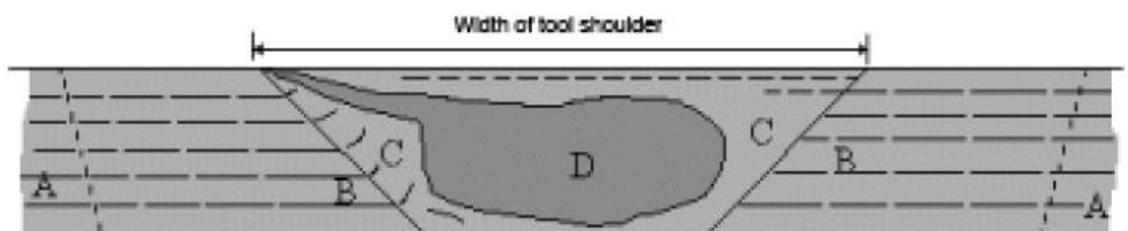
Dunia industri dan penelitian, mayoritas fokus dalam mengembangkan pengelasan untuk aluminium lembaran dan pelat sampai tebal 3 inci. FSW juga digunakan untuk membuat sambungan *butt* antar logam dengan ketebalan yang berbeda. FSW dapat dilakukan di semua posisi (*horizontal, vertical, overhead dan orbital*). FSW

telah banyak di aplikasikan di indsutri 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 dari biaya desain, 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 di bandingkan aplikasi *fastener* dan dapat memperbaiki sifat korosif dengan mengurangi *fastener* yang merupakan sumber utama dari kontak metal berbeda jenis. Dan penghematan terahir berasal dari hilangnya biaya untuk keperluan *sealant*, *locking coumpound* dan sejenisnya.

2.3 Siklus Termal Las

Berdasarkan TWI 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 recrystalized zone* (DXZ). Begitu juga TMAZ, beberapa orang menyebutnya *Heat and deformation affected zone* (HDAZ) atau *Partial recrystalized zone* (PRZ).



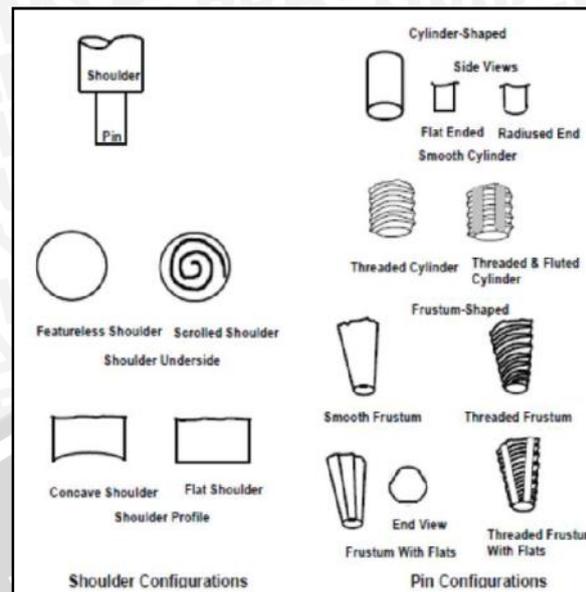
Gambar 2.4 Variasi region pada potongan material hasil FSW. A, *unaffected material or parent metal*; B, *heat-affected zone*; C, *thermomechanically affected zone*; D, *weld nugget*

Sumber : Mishra, 2007 : 2

Terdapat beberapa hal penting yang ditambahkan dalam ilustrasi di atas, 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 2.4, 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 di atas, 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

2.4 Perancangan Tool.

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. 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 pencampuran material dilakukan pada putaran yang lebih tinggi dan menghasilkan kualitas yang lebih baik karena bisa mereduksi kekosongan sambungan. *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*.



Gambar 2.5 Konfigurasi *shoulder* dan *pin*
 Sumber : khaled, terry, 2005 : 115

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* (Rajiv S. Mishra, Murray W *Friction stir welding and processing*, editors, p 1-5, 2007).

Rancangan *tool* adalah faktor yang sangat mempengaruhi kualitas hasil lasan, karena rancangan *tool* yang tepat dapat meningkatkan kualitas las dan kecepatan las semaksimal mungkin. Panas yang dihasilkan dari gesekan *tool* dan material yang akan dilas sekitar 70 – 80% dari temperatur titik lebur material yang akan dilas tersebut. Material *tool* harus memiliki titik cair yang lebih tinggi dari material las, agar ketika proses pengelasan berlangsung material *tool* ikut tercampur dengan lasan. Material *tool* harus mempunyai kekuatan yang cukup pada temperatur ini karena jika tidak maka *tool* dapat terpuntir dan retak. Oleh sebab itu diharapkan material *tool* cukup kuat, keras dan liat, pada suhu pengelasan. Sebaiknya material yang digunakan juga mempunyai ketahanan oksida yang baik dan penghantar panas rendah untuk mengurangi kerugian panas dan kerusakan termal pada mesin. Desain *tool* terdiri dari *shoulder* dan *pin*. *Pin* berfungsi untuk menghasilkan panas dan menggerakkan material yang sedang dilas. *Shoulder* memiliki beberapa fungsi antara lain:

1. Sebagai pelindung dari kemungkinan masuknya suatu material berbeda.
2. *Shoulder* yang berdiameter lebih besar, berperan untuk mempertahankan dan menjaga agar material *plasticised* tidak keluar dari daerah las.
3. *Shoulder* memberi tekanan kebawah yang memberi efek tempa pada lasan.
4. *Shoulder* juga menyediakan *input* panas tambahan, karena luas permukaan yang bergesekan dengan material las lebih besar maka panas yang dihasilkan juga lebih besar.

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.

2.5 Energi Input

Dalam proses pengelasan merupakan suatu yang sangat penting untuk memperkirakan jumlah kalor yang dihasilkan, oleh karena itu diperlukan sebuah model atau pendekatan untuk memperkirakan besar kalor yang dihasilkan. Salah satu model paling sederhana yang dipakai adalah hukum gesekan Coulomb's. Pada proses pengelasan dengan menggunakan metode *friction stir welding* panas yang dihasilkan berasal dari *shoulder*, sisi *pin* dan ujung dari *pin*, meskipun masih memiliki beberapa kelemahan karena beberapa faktor penting tidak ikut diperhitungkan seperti *welding speed* dan *heat losses*, persamaan *heat input* (2.4, 2.7, dan 2.10) yang merupakan integrasi dari persamaan 2.1 bisa menjadi acuan dasar dalam menentukan *heat input*. Adapun persamaan untuk menghitung *heat input* dari ketiga sisi *probe* tersebut adalah sebagai berikut:

Persamaan Awal :

$$Q = \tau \cdot \omega \quad \text{Lohwasser ,Hal 280} \quad (2.1)$$

Kalor yang dihasilkan *shoulder* :

$$Q_{\text{shoulder}} = \int_{R_{\text{Probe}}}^{R_{\text{Shoulder}}} \int_0^{2\pi} \tau_{\text{Contact}} \cdot \omega \cdot r \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \quad \text{Lohwasser ,Hal 281} \quad (2.2)$$

$$= \int_{R_{\text{Probe}}}^{R_{\text{Shoulder}}} 2 \pi \cdot \tau_{\text{Contact}} \cdot \omega \cdot r^2 \cdot dr \quad \text{Lohwasser ,Hal 281} \quad (2.3)$$

$$= \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{\text{Contact}} \cdot (R_{\text{Shoulder}}^3 - R_{\text{Probe}}^3) \quad \text{Lohwasser ,Hal 281} \quad (2.4)$$

Kalor yang dihasilkan sisi *pin* :

$$Q_{Probe\ Side} = \int_0^{-H_{Probe}} \int_0^{2\pi} 2 \pi \cdot \tau_{Contact} \cdot \omega \cdot r \cdot r \cdot d\theta \cdot dz \quad \text{Lohwasser ,Hal 281 (2.5)}$$

$$= \int_0^{-H_{Probe}} 2 \pi \cdot \tau_{Contact} \cdot \omega \cdot r^2 \cdot dz \quad \text{Lohwasser ,Hal 281 (2.6)}$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \tau_{contact} \cdot R_{Probe}^2 \cdot H_{probe} \quad \text{Lohwasser ,Hal 281 (2.7)}$$

Kalor yang dihasilkan ujung *pin* :

$$Q_{probe\ tip} = \int_0^{R_{Shoulder}} \int_0^{2\pi} \tau_{Contact} \cdot \omega \cdot r \cdot r \cdot d\theta \cdot dr \quad \text{Lohwasser ,Hal 281 (2.8)}$$

$$= \int_{R_{Probe}}^{R_{Shoulder}} 2 \pi \cdot \tau_{Contact} \cdot \omega \cdot r^2 \cdot dr \quad \text{Lohwasser ,Hal 281 (2.9)}$$

$$= \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{Contact} \cdot R_{Probe}^3 \quad \text{Lohwasser ,Hal 281 (2.10)}$$

Sehingga panas total yang dihasilkan adalah penjumlahan dari ketiganya

$$Q_{total} = Q_{shoulder} + Q_{probe\ side} + Q_{probe\ tip}$$

$$Q_{total} = \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{Contact} \cdot (R_{Shoulder}^3 + 3R_{Probe}^2 H_{probe}) \quad \text{Lohwasser ,Hal 281 (2.11)}$$

Keterangan :

- $\tau_{Contact}$ = Tegangan geser Aluminium (Pa)
- ω = Kecepatan Putar (rev/menit)
- $R_{Shoulder}$ = Jari – Jari *Shoulder* (m)
- R_{Pin} = Jari – jari *pin* (m)
- H_{Probe} = Tinggi *Pin* (m)

Selain pemodelan analitik dengan beberapa persamaan yang ada diatas, *heat input* juga dapat dihitung melalui metode *experimental* dengan mencari tahu torsi yang terjadi pada saat proses pengelasan berlangsung sehingga *power input* yang terjadi dapat dihitung dan *heat input* total yang dihasilkan *tool* bisa dihitung dengan lebih baik. Akan tetapi pemodelan dengan metode *experimental* juga masih memiliki beberapa kelemahan karena tidak mengitung *heat loss* yang terjadi dan hanya bisa dilakukan

pada mesin dengan instrument yang dapat terus memonitor torsi pada saat proses pengelasan berlangsung. Adapun persamaanya adalah sebagai berikut:

$$Weld\ Power(PI) = \frac{2\pi \cdot \Omega \cdot M}{60} \text{ (watt)} \quad \text{T. W. Nelson, Hal 4 (2.12)}$$

$$HI(Heat\ Input) = \frac{PI(Power\ Input)}{v} \text{ (joule/m)} \quad \text{T. W. Nelson, Hal 4 (2.13)}$$

Keterangan :
 PI = weld power (watt)
 HI = Heat Input (joule/mm)
 V = Kecepatan pengelasan (m/menit)
 M = Momen yang terjadi (Nm)
 ω = kecepatan putar (rev/menit)

2.6 Aluminium

Aluminium merupakan logam *non ferro* yang memiliki sifat ringan dan tahan karat. Aluminium dipakai sebagai paduan berbagai logam murni, sebab tidak kehilangan sifat ringan dan sifat-sifat mekanisnya dan mampu cornya diperbaiki dengan menambah unsur-unsur lain. Unsur-unsur paduan itu adalah tembaga, silikon, magnesium, mangan, nikel, dan sebagainya yang dapat merubah sifat paduan aluminium (Surdia, 1991).

Pengaruh unsur-unsur pemadu pada paduan aluminium adalah sebagai berikut:

a. Silikon (Si)

Unsur Si dalam paduan aluminium mempunyai pengaruh positif :

- Meningkatkan sifat mampu alir (*Hight Fluidity*).
- Mempermudah proses pengecoran.
- Meningkatkan daya tahan terhadap korosi.
- Memperbaiki sifat-sifat atau karakteristik coran.
- Menurunkan penyusutan dalam hasil cor.
- Penurunan keuletan bahan terhadap beban kejut jika kandungan silikon terlalu tinggi.

b. Tembaga (Cu)

Pengaruh baik yang dapat timbul oleh unsur Cu dalam paduan aluminium:

- Meningkatkan kekerasan bahan.
- Memperbaiki kekuatan tarik.
- Mempermudah proses pengerjaan dengan mesin.

Pengaruh buruk yang dapat ditimbulkan oleh unsur Cu :

- Menurunkan daya tahan terhadap korosi.
- Mengurangi keuletan bahan.
- Menurunkan kemampuan dibentuk dan dirol.

c. Unsur Magnesium (Mg)

Magnesium memberikan pengaruh baik yaitu:

- Mempermudah proses penuangan.
- Meningkatkan kemampuan pengerjaan mesin.
- Meningkatkan daya tahan terhadap korosi.
- Meningkatkan kekuatan mekanis.
- Menghaluskan butiran kristal secara efektif.
- Meningkatkan ketahanan beban kejut atau impact.

Pengaruh buruk yang ditimbulkan oleh unsur Mg:

- Meningkatkan kemungkinan timbulnya cacat pada hasil pengecoran

d. Unsur besi (Fe)

Pengaruh baik yang dapat ditimbulkan oleh unsur Fe adalah :

- mencegah terjadinya penempelan logam cair pada cetakan.

Pengaruh buruk yang dapat ditimbulkan unsur paduan ini adalah :

- Penurunan sifat mekanis.
- Penurunan kekuatan tarik.
- Timbulnya bintik keras pada hasil coran.
- Peningkatan cacat porositas.

Macam-macam unsur paduan aluminium dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

a. Paduan aluminium – tembaga, aluminium – tembaga - silikon.

Paduan aluminium - tembaga adalah paduan aluminium yang mengandung tembaga 4,5 %, memiliki sifat-sifat mekanik dan mampu mesin yang baik sedangkan mampu cornya agak jelek. Paduan aluminium tembaga – silikon dibuat dengan menambah 4 – 5 % silikon pada paduan aluminium tembaga untuk memperbaiki sifat mampu cornya. Paduan ini dipakai untuk bagian – bagian motor, mobil, dan rangka utama dari katup (Surdia, 1991).

b. Paduan aluminium – silikon, aluminium – silikon – magnesium.

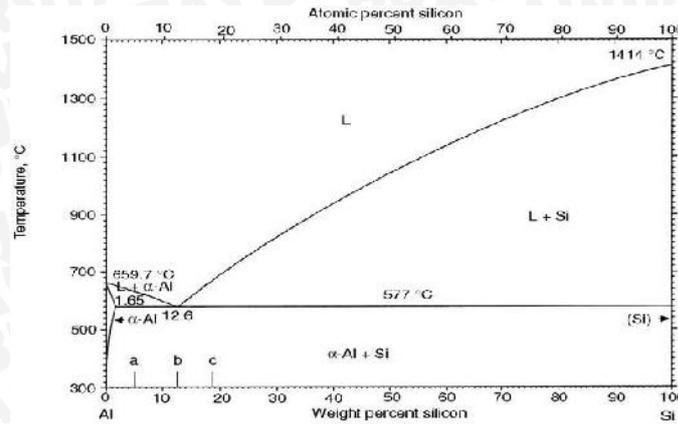
Paduan dari aluminium dan silikon sekitar 2 % disebut silumin yang memiliki mampu cor yang baik, sehingga sering dipakai untuk bagian – bagian mesin biasa. Tetapi paduan yang biasa dicor mempunyai sifat mekanik yang jelek karena butir – butir silikon yang besar, sehingga dicor dengan tambahan natrium dan agitasi dari logam cair untuk membuat kristal halus dan memperbaiki sifat – sifat mekanik, tetapi cara ini tidak efektif untuk coran besar. Paduan aluminium silikon diperbaiki sifat mekaniknya dengan menambahkan magnesium, tembaga atau mangan dan selanjutnya diperbaiki dengan perlakuan panas (Surdia, 1991).

c. Paduan aluminium – magnesium.

Paduan aluminium yang mengandung magnesium 4 % atau 10 % mempunyai ketahanan korosi dan sifat mekanik yang baik. Paduan ini mempunyai kekuatan tarik diatas 30 kgf/mm^2 dan perpanjangan diatas 12 % dipakai untuk alat – alat industri kimia , kapal laut, dan pesawat terbang (Surdia, 1991).

d. Paduan aluminium tahan panas.

Paduan ini terdiri dari Al – Cu – Ni – Mg yang kekuatannya tidak berubah sampai 300°C , sehingga paduan ini dipakai untuk torak dan tutup silinder.



Gambar 2.6. Diagram fasa paduan Al-Si
Sumber : ASM Internasional, 2004

• Sifat – sifat Aluminium

Perlu diketahui aluminium merupakan logam yang paling banyak terkandung di kerak bumi. Aluminium terdapat di kerak bumi sebanyak kira-kira 8,07% hingga 8,23% dari seluruh massa padat dari kerak bumi. Dengan produksi tahunan dunia sekitar 30 juta ton pertahun dalam bentuk bauksit dan bebatuan lain. Saat ini aluminium berkembang luas dalam banyak aplikasi industri seperti industri otomotif, rumah tangga, maupun elektrik, karena beberapa sifat dari aluminium itu sendiri, yaitu:

1. Ringan (*light in weight*)

Aluminium memiliki sifat ringan, bahkan lebih ringan dari magnesium dengan densitas sekitar 1/3 dari densitas besi. Kekuatan dari paduan aluminium dapat mendekati dari kekuatan baja karbon dengan kekuatan tarik 700 MPa (100 Ksi). Kombinasi ringan dengan kekuatan yang cukup baik membuat aluminium sering diaplikasikan pada kendaraan bermotor, pesawat terbang, alat-alat konstruksi seperti tangga, *scaffolding*, maupun pada roket.

2. Mudah dalam pembentukannya (*easy fabrication*)

Aluminium merupakan salah satu logam yang mudah untuk dibentuk dan mudah dalam fabrikasi seperti *ekstrusi*, *forging*, *bending*, *rolling*, *casting*, *drawing*, dan *machining*. Struktur kristal yang dimiliki aluminium adalah struktur kristal FCC (*Face Centered Cubic*), sehingga aluminium tetap ulet meskipun pada temperatur yang sangat rendah. Bahan aluminium mudah dibentuk menjadi bentuk yang kompleks dan tipis sekalipun, seperti bingkai jendela, lembaran aluminium foil, rel, gording, dan lain sebagainya.

3. Tahan terhadap korosi (*corrosion resistance*)

Aluminium tahan terhadap korosi karena fenomena pasivasi. Pasivasi adalah pembentukan lapisan pelindung akibat reaksi logam terhadap komponen udara sehingga lapisan tersebut melindungi lapisan dalam logam dari korosi. Hal tersebut dapat terjadi karena permukaan aluminium mampu membentuk lapisan alumina (Al_2O_3) bila bereaksi dengan oksigen.

4. Konduktifitas panas tinggi (*high thermal conductivity*)

Konduktifitas panas aluminium tiga kali lebih besar dari besi, maupun dalam pendinginan dan pemanasan. Sehingga aplikasi banyak digunakan pada radiator mobil, koil pada evaporator, alat penukar kalor, alat-alat masak, maupun komponen mesin.

5. Konduktifitas listrik tinggi (*high electrical conductivity*)

Konduktifitas listrik dari aluminium dua kali lebih besar dari pada tembaga dengan perbandingan berat yang sama. Sehingga sangat cocok digunakan dalam kabel transmisi listrik.

6. Tangguh pada temperatur rendah (*high toughness at cryogenic temperature*)

Aluminium tidak menjadi getas pada temperatur rendah hingga $-100^{\circ}C$, bahkan menjadi lebih keras dan ketangguhan meningkat. Sehingga aluminium dapat digunakan pada material bejana yang beroperasi pada temperatur rendah (*cryogenic vessel*)

7. Tidak beracun (*non toxic*)

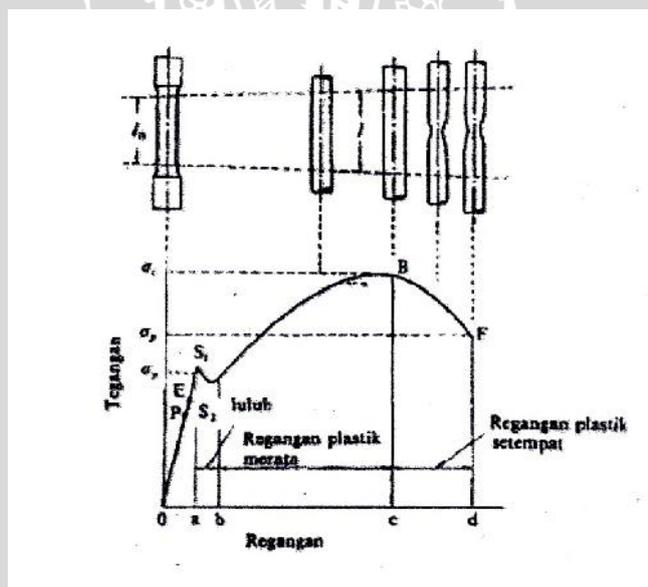
Aluminium tidak memiliki sifat racun pada tubuh manusia, sehingga sering digunakan dalam industri makanan seperti kaleng makanan dan minuman, serta pipa-pipa penyalur pada industri makanan dan minuman.

8. Mudah didaur ulang (*recyclability*)

Aluminium mudah untuk didaur ulang, bahkan 30% produksi aluminium di Amerika berasal dari aluminium yang didaur ulang. Pembentukan kembali aluminium dari material bekas hanya membutuhkan 5% energi dari pemisahan aluminium dari bauksit. Dengan berbagai keunggulan dari aluminium tersebut, saat ini penggunaan aluminium sangat berkembang pesat terutama pada industri pesawat terbang dan otomotif. Masih banyak pengembangan yang dilakukan sehingga dapat menciptakan paduan aluminium baru yang memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda.

2.7 Pengujian tarik

Proses pengujian tarik bertujuan untuk mengetahui kekuatan tarik benda uji. Pengujian tarik daerah sambungan las dimaksudkan untuk mengetahui apakah kekuatan las memiliki nilai yang sama, lebih rendah atau lebih tinggi dari kelompok raw material. Pengujian tarik untuk kualitas kekuatan tarik dimaksudkan untuk mengetahui berapa nilai kekuatannya dan dimanakah letak putusnya suatu sambungan. Pembebanan tarik adalah pembebanan yang diberikan pada benda dengan memberikan gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujung benda. Penarikan gaya terhadap beban akan mengakibatkan terjadinya perubahan (deformasi) bahan tersebut. Proses terjadinya deformasi pada benda uji adalah proses pergeseran butiran Kristal logam yang mengakibatkan melemahnya gaya elektromagnetik setiap atom logam sehingga terlepas ikatan tersebut oleh penarikan gaya maksimum. Pada pengujian tarik beban diberikan secara continue dan pelan – pelan bertambah besar, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan mengenai perpanjangan yang dialami benda uji dan dihasilkan kurva tegangan regangan.



Gambar 2.7 Kurva tegangan regangan

Sumber : Wiryosumarto, 2000 : 181

Tegangan dapat diperoleh dengan membagi beban dengan luas penampang benda uji.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Surdia, hal 8 (2.14)

Keterangan:

σ = Tegangan (N/m²)

P = Beban maksimal (N)

A = Luas penampang mula – mula (m²)

Regangan adalah persentase pertambahan panjang yang diperoleh dengan membagi perpanjangan panjang ukur (L) dengan panjang ukur mula – mula benda uji.

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad \text{Surdia, hal 8} \quad (2.15)$$

Keterangan:

ε = Regangan

L = Panjang akhir (m)

L_0 = Panjang awal (m)

Pembebanan tarik dilakukan terus – menerus dengan menambahkan beban hingga mengakibatkan perubahan bentuk pada benda uji berupa pertambahan panjang dan pengecilan luas permukaan yang akan menyebabkan kepatahan pada benda uji. Persentase pengecilan yang terjadi dapat dinyatakan dengan rumus:

$$q = \frac{A_0-A_1}{A_0} \times 100\% \quad \text{Wirjosumarto, hal 180} \quad (2.16)$$

Keterangan:

q = Reduksi Penampang (%)

A_0 = Luas penampang awal (m²)

A_1 = Luas penampang akhir (m²)

2.8 Anova Dua Jalur (*two ways – Anova*)

Anava atau anova adalah anonim dari analisis varian terjemahan dari *analysis of variance*, sehingga banyak orang yang menyebutnya dengan anova. Anova merupakan bagian dari metode analisis statistika yang tergolong analisis komparatif (perbandingan) lebih dari dua rata-rata (Riduwan, 2003:217).

Anova dua jalur digunakan untuk menguji hipotesis perbandingan lebih dari dua sampel dan setiap sampel terdiri atas dua jenis atau lebih secara bersama-sama. Langkah-langkah uji anova dua jalur adalah:

1. Sebelum anova dihitung, asumsikan bahwa data dipilih secara random, berdistribusi normal dan variannya homogen.
2. Buatlah hipotesis (H_a dan H_o) dalam bentuk kalimat.
3. Buatlah hipotesis (H_a dan H_o) dalam bentuk statistika.
4. Buatlah daftar statistika induk seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Daftar statistika induk

Variabel	Pengulangan	Welding Speed			Total Baris
		42	55	74	
Diameter Shoulder	8	1	X_{111}	X_{121}	X_{131}
		2	X_{112}	X_{122}	X_{132}
		3	X_{113}	X_{123}	X_{133}
	Jumlah				
	10	1	X_{211}	X_{221}	X_{231}
		2	X_{212}	X_{222}	X_{232}
		3	X_{213}	X_{223}	X_{233}
	Jumlah				
	12	1	X_{311}	X_{321}	X_{331}
		2	X_{312}	X_{322}	X_{332}
		3	X_{313}	X_{323}	X_{333}
	Jumlah				
	Jumlah				

5. Hitunglah jumlah kuadrat total (JK_T).

$$JKT = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^n X_{ijm}^2 - \frac{T_{***}^2}{rkn} \quad \text{Walpole, hal 408} \quad (2.17)$$

6. Hitunglah jumlah kuadrat baris (JKB)

$$JKB = \frac{\sum_{i=1}^r T_i^{2**}}{kn} - \frac{T_{***}^2}{rkn} \quad \text{Walpole, hal 408} \quad (2.18)$$

7. Hitunglah jumlah kuadrat kolom (JKA)

$$JKK = \frac{\sum_{j=1}^k T_{i^{**}}^2}{rn} - \frac{T_{***}^2}{rkn} \quad \text{Walpole, hal 408} \quad (2.19)$$

8. Hitunglah jumlah kuadrat interaksi baris dan kolom (JK[BK])

$$JK[BK] = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^k T_{ij}^2}{n} - \frac{\sum_{i=1}^r T_{i^{**}}^2}{kn} - \frac{\sum_{j=1}^k T_{*j}^2}{rn} + \frac{T_{***}^2}{rkn} \quad (2.20)$$

9. Hitunglah jumlah kuadrat galat (JKG)

$$JKG = JKT - JKB - JKK - JK[BK] \quad \text{Walpole, hal 408} \quad (2.21)$$

10. Mencari derajat bebas (db_B ; db_K ; $db_{[BK]}$; db_G ; db_T)

$$db_B \text{ (BARIS)} = r-1 \quad \text{Walpole, hal 409} \quad (2.22)$$

$$db_K \text{ (KOLOM)} = k-1 \quad (2.23)$$

$$db_{[BK]} \text{ (INTERAKSI)} = (r-1) \cdot (k-1) \quad (2.24)$$

$$db_G \text{ (GALAT)} = r \cdot k \cdot (n-1) \quad (2.25)$$

$$db_T \text{ (TOTAL)} = [r \cdot k \cdot n] - 1 \quad (2.26)$$

11. Menghitung Kuadrat Rerata antar group (KTB; KTK; KT[BK]; KTG)

$$KTB = \frac{JKB}{r-1} \quad \text{Walpole, hal 409} \quad (2.27)$$

$$KTK = \frac{JKK}{k-1} \quad \text{Walpole, hal 409} \quad (2.28)$$

$$KT[BK] = \frac{JK[BK]}{[r-1][k-1]} \quad \text{Walpole, hal 409} \quad (2.29)$$

$$KTG = \frac{JKG}{r \cdot k \cdot [n-1]} \quad \text{Walpole, hal 409} \quad (2.30)$$

12. Carilah F_{hitung} (F_A ; F_B ; F_{AB}) masing-masing group.

$$F_B = \frac{KTB}{KTG} \quad \text{Walpole, hal 409} \quad (2.31)$$

$$F_K = \frac{KTK}{KTG} \quad \text{Walpole, hal 409} \quad (2.32)$$

$$F_{[BK]} = \frac{KT[BK]}{KTG} \quad \text{Walpole, hal 409} \quad (2.33)$$

13. Tentukan taraf signifikannya, misalnya $\alpha = 0,05$ atau $\alpha = 0,01$

14. Cari F_{tabel} (F_B ; F_K ; $F_{[BK]}$) masing-masing group.

$$F_{B(tabel)} = F_B(\alpha) (db_B:db_G)$$

$$F_{K(tabel)} = F_K(\alpha) (db_K:db_G)$$

$$F_{[BK](tabel)} = F_{[BK]}(\alpha) (db_{[BK]}:db_G)$$

15. Buatlah tabel ringkasan anova

Tabel 2.2 Daftar Ringkasan Anova

Sumber Keragaman (SK)	Jumlah kuadrat (JK)	Derajat bebas (db)	Kuadrat Tengah (KT)	F_{hitung}	F_{tabel}
Nilai tengah Baris					
Nilai tengah kolom					
Interaksi [BK]					
Galat					
Total					

16. Tentukanlah kriteria pengujian: Jika $F_{hitung} \geq F_{tabel}$ maka tolak H_0 berarti signifikan dan konsultasikan antara F_{hitung} dengan F_{tabel} kemudian bandingkan.

17. Buatlah kesimpulan.



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat Dan Waktu Penelitian

Penelitian ini mulai dilakukan dari tanggal 2 Oktober 2013 dan berakhir pada tanggal 19 Desember 2013. Tempat yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah:

- Laboratorium Proses Produksi, Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
- Laboratorium Pengujian Bahan, Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
- Laboratorium Divisi karakteristik material, Jurusan teknik material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh November.

3.2 Variabel Penelitian

Terdapat tiga variabel dalam penelitian ini, yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel terkontrol.

3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi nilai dari variabel terikat, besarnya ditentukan oleh peneliti dan harganya divariasikan untuk mendapatkan hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat dari objek penelitian. Variabel bebas yang digunakan adalah *welding speed* dan diameter *Shoulder*. Untuk kecepatan pengelasan divariasikan menjadi 42, 55, dan 74 mm/menit. Sedangkan untuk variasi diameter *Shoulder* adalah 8 , 10, dan 12 mm.

3.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi oleh besarnya variabel bebas yang telah ditentukan. Variabel terikat atau variabel respon dari penelitian ini adalah kekuatan tarik dari sambungan hasil dari proses pengelasan dengan metode *Friction stir welding*.

3.2.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya diatur dan dijaga konstan selama proses penelitian berlangsung, variabel yang dijaga konstan dalam penelitian kali ini adalah :

- a. *Tool Inclined Angle* sebesar 2°
- b. *Shoulder Deep Plunge* 0,2 mm
- c. Kecepatan putar konstan yaitu 2257.
- d. Tebal material 3 mm.
- e. Panjang probe 2,5 mm

3.3 Peralatan Penelitian

Pada penelitian kali ini peralatan yang digunakan adalah terbagi dalam tiga garis besar yaitu:

1. *Pin Tool (Probe)*

Merupakan Alat bantu utama yang digunakan dalam proses FSW dimana probe berfungsi sebagai *tool* yang membuat menyatunya kedua material.

2. Mesin FSW (mesin *Milling*)

Pada pengelesan FSW mesin *Milling* berfungsi sebagai alat tempat *probe* agar bisa melakukan proses pengelasan.

3. Komponen pendukung.

Karena benda kerja akan dikenai gaya yang timbul karena gesekan dan tekanan dari *probe* yang terpasang pada mesin *Milling* maka diperlukan komponen pendukung agar saat proses pengelasan berlangsung benda kerja tidak mengalami pergeseran karena terkena gaya yang besar dari *probe*.

3.4 Bahan penelitian

Bahan yang digunakan dalam proses penelitian kali ini adalah plat Aluminium dengan ketebalan plat 3 mm. Dalam dunia manufaktur Aluminium biasanya digunakan untuk material konstruksi. Aluminium memiliki sifat tahan korosi dan kekuatan yang baik.



Gambar 3.1 : Spesimen hasil Pengelasan

3.5 Spesisfikasi peralatan penelitian

1. Mesin uji tarik

Merek	: MLF Piuf.Und Mc By Heme Gmbh D6800
Kapasitas	: 100 kN
Tipe	: U PD 10
Tahun	: 1982

Alat ini digunakan untuk member beban tarik pada spesimen. Alat ini mempunyai 3 skala pembebanan.

A	= 0 - 20 kN
A+B	= 0 - 50 kN
A+B+C	= 0 - 100 kN



Gambar 3.2 : Mesin uji tarik

Sumber : Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya 2013.

2. Mesin *milling universal*.

Merek	: Dahlih model SM7VH
Serial No	: SM7VH
Made in	: Taiwan
X-Travel	: 950 mm
Y-Travel	: 350 mm
Z- Travel	: 470 mm
Daya Motor	: 5 Hp (3,7kw)
Tahun	: 1982



Gambar 3.3 : Mesin *milling* standar.

Sumber : Laboratorium Pengujian Proses produksi I Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya 2013.

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Proses persiapan pengelasan benda

1. Mempersiapkan mesin *Milling*.
2. Mempersiapkan material atau benda kerja yang akan dilas, dimana dimensi benda kerja yang akan dilas harus sudah sesuai dengan standard untuk pengujian tarik nantinya.
3. Memberikan nomor urut atau tanda pada benda kerja sesuai dengan parameter – parameter yang ada.
4. Memprsiapkan peralatan yang diperlukan untuk mencekam benda kerja pada meja kerja mesin *Milling*.
5. Mencekam benda kerja yang akan dilas dengan pada meja mesin *miling*.
6. Mengatur posisi mesin *Milling* agar didapatkan *Inclined Angle* sebesar 2°
7. Mepersiapkan *tool* yang sesuai.
8. Penyetingan parameter mesin seperti kecepatan putaran spindle dan kecepatan pengelasan, kecepatan putaran disetting konstan pada 2257 Rpm, sedangkan kecepatan pengelasan di atur pada 42, 55, dan 74mm/menit.

9. Kemudian cek semua fungsi penguncian dari meja mesin *Milling*, pastikan semua bekerja dengan baik.

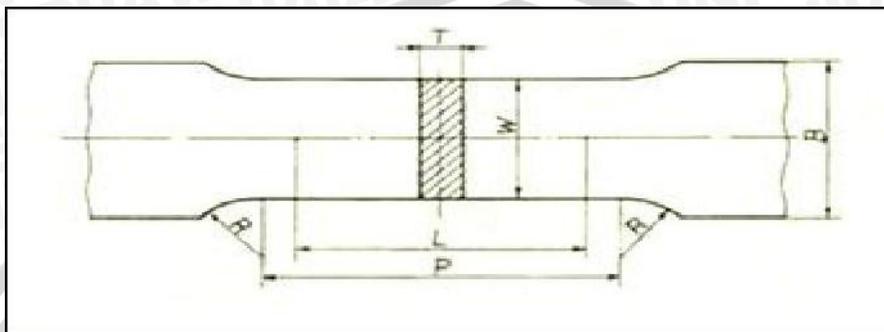
3.6.2 Proses pengelasan benda

Proses pengelasan dapat dilakukan apabila semua alat uji, benda kerja dan persiapan pengelasan telah siap. Langkah proses pengelasan adalah sebagai berikut :

1. Pasang *tool* pada *collet*, *tool* dipasang setelah *collet* terpasang pada adaptornya untuk meminimalisir kerusakan pada *collet*.
2. Kemudian setting rpm sesuai dengan yang diinginkan dengan memindahkan *van belt* pada *puley* yang ada di mesin *Milling*. Perpindahan rpm dilakukan secara manual.
3. Cekam benda kerja pada meja yang dibuat sesuai tebal benda kerja. Dengan menggunakan besi tebal dan plat besi sebagai alas benda kerja, kemudian benda kerja di kancing dengan besi dan baut. Kemudian kencangkan dengan maksimal.
4. Sebelum melakukan pengelasan. *Setting* alur pengelasan benda kerja agar rata dengan *tool* pengelasan. Kemudian hidupkan mesin dengan parameter yang sudah ditentukan.
5. Posisikan FSW *tool* sedekat mungkin dengan spesimen. Posisi *tool* tidak boleh melewati sisi terluar karena akan menghalangi *downforce* dari *Shoulder tool*.
6. Penetrasikan atau tekan *tool* FSW sampai *Shoulder* menyentuh benda kerja.
7. Kemudian gerakan meja searah sumbu X dengan kecepatan pengelasan konstan 42, 55, dan 74 mm/menit dengan jarak tempuh 90 mm. Pergerakan meja dilakukan secara otomatis untuk menjaga kecepatan meja tetap konstan.
8. Setelah mencapai ujung benda kerja. Hentikan pergerakan meja kerja kemudian tarik *tool* keluar dari benda kerja.
9. Matikan *spindle* mesin dan posisikan benda kerja terbebas dari *tool* FSW.
10. Lepas benda kerja dari pencekam.
11. Angkat benda kerja menggunakan tang penjepit kemudian beri nomor sebagai penanda spesimen.
12. Matikan mesin *Milling*.

3.6.3 Proses pengujian tarik

Proses pengujian tarik yang dilakukan pada spesimen akan mengikuti standar JIS dimana untuk spesimen dengan tipe sheet plate dengan tebal 3 mm atau kurang menggunakan standar benda uji no 13B. berikut adalah ilustrasi dari test piece yang akan dibuat sebagai benda kerja untuk pengujian tarik.



Gambar 3.4 standar benda uji No 13 menurut JIS

Sumber : Samsuardi, 2011 : 31

Tabel 3.1 keterangan dimensi spesimen benda uji tarik menurut JIS

Nomor batang uji	Lebar (W)	Panjang ukur (L)	Panjang bagian Paralel (P)	Jari-jari bahu (R)	Lebar bagi
13 A	20	80	120	20-30	-
13 B	12,5	50	60	20-30	20 atau lebih

Prosedur dan pembacaan hasil pada pengujian tarik adalah sebagai berikut. Benda uji dijepit pada ragum uji tarik, setelah sebelumnya diketahui penampangnya, panjang awalnya dan ketebalannya. Langkah pengujinya sebagai berikut:

1. Benda uji mulai mendapatkan beban tarik dengan menggunakan tenaga hidrolik hingga benda putus.
2. Benda uji yang sudah putus lalu diukur berapa besar penampang dan panjang benda uji setelah putus.
3. Beban maksimum diperoleh dari data yang terlihat pada layar atau jarum penunjuk .
4. Hal terakhir yaitu menghitung kekuatan tarik dari data yang telah didapat dengan menggunakan persamaan yang ada.

3.7 Rancangan penelitian

Rancangan penelitian digunakan untuk mencari pengaruh dari suatu faktor atau variabel dalam hal ini diameter *Shoulder* dan *Welding speed* terhadap kekuatan tarik sambungan las Alunimuim dengan metode FSW.

3.7.1 Analisa statistik

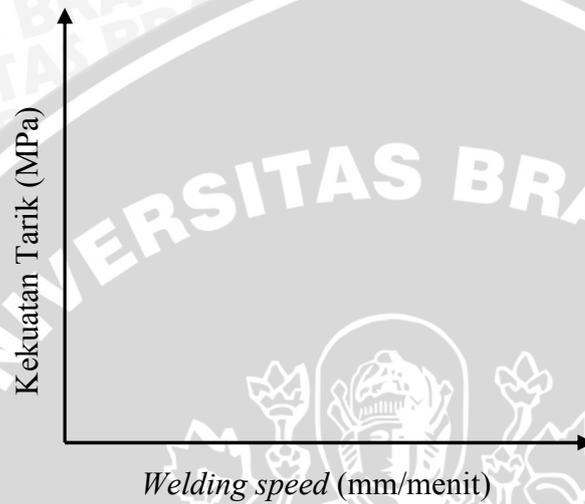
Pengujian ini meliputi uji tarik pada material Aluminium yang mengalami pengelasan FSW dengan variasi diameter *Shoulder* dan *Welding speed*.

Table 3.2 Rancangan data pengujian dengan variasi *welding speed* dan diameter *Shoulder*.

No	<i>Welding speed</i> (mm/menit)	Diameter <i>Shoulder</i> (mm)	UTS (MPa)
1	42	8	
2		10	
3		12	
4	55	8	
5		10	
6		12	
7	74	8	
8		10	
9		12	

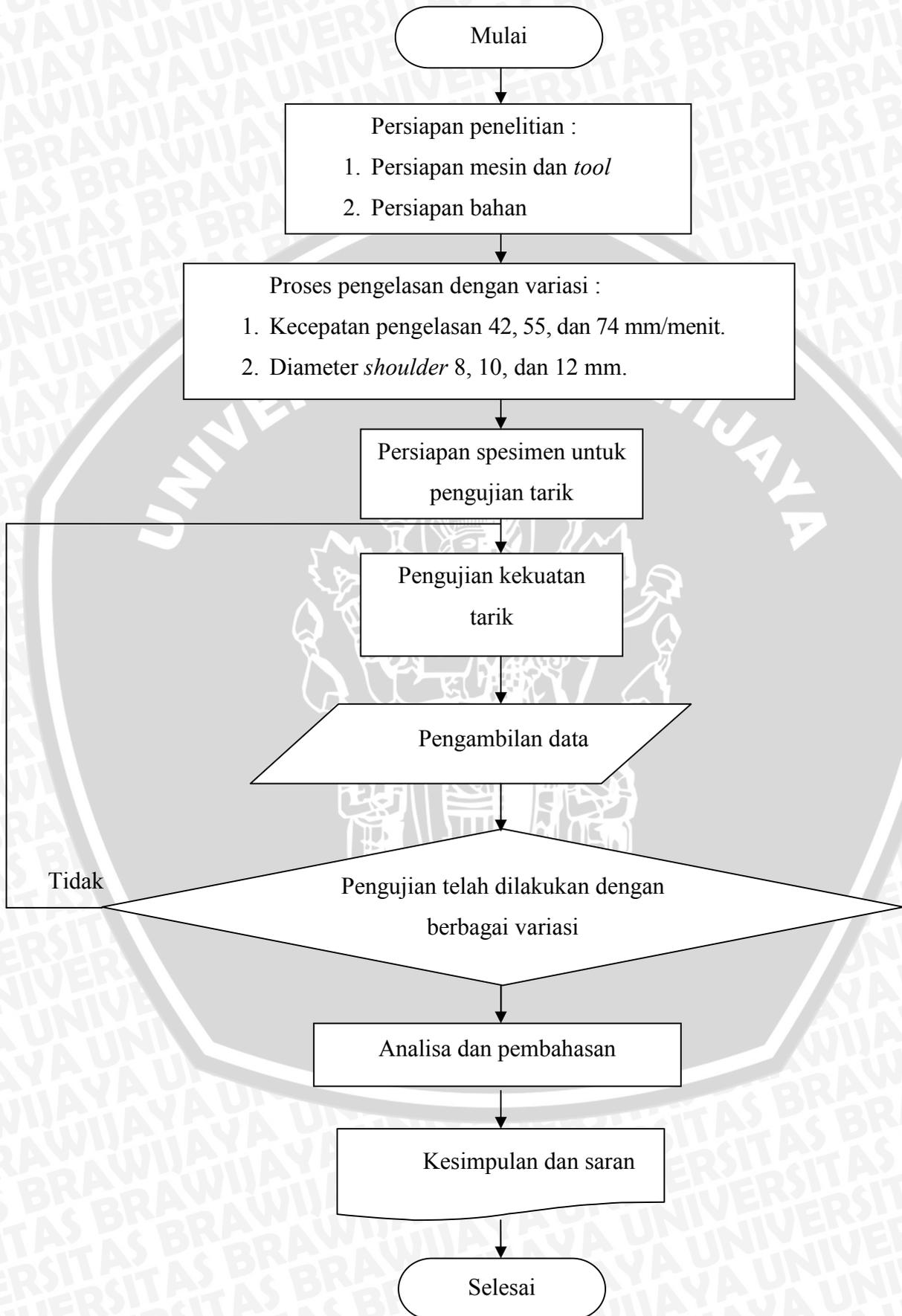
3.7.2 Analisa grafik

Untuk menganalisa grafik peneliti menggunakan bantuan software Microsoft Excel, analisa grafik dilakukan melalui pengamatan perubahan trend data pada grafik yang diperoleh dari plotting data.



Gambar 3.5 Grafik hubungan antara *Welding speed* dan diameter *shoulder* terhadap kekuatan tarik

3.8 Diagram alir



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Data Kekuatan Tarik Aluminium Hasil Pengelasan

Dalam penelitian ini, dilakukan pengambilan data dengan melakukan pengujian tarik terhadap sambungan hasil lasan dengan metode FSW (*Friction Stir Welding*). Pengujian tarik sendiri menggunakan alat mesin uji tarik (*universal testing machine*) dimana sebelumnya spesimen telah dibentuk sesuai dengan standar untuk pengujian tarik. Pada setiap pemakaian *welding speed* dan diameter *shoulder* yang berbeda nantinya dapat dibentuk menjadi tiga spesimen uji tarik untuk tiga kali proses pengulangan yang nantinya diperoleh nilai rata-rata dari ketiga pengujian. Nilai yang diperoleh dari hasil uji tarik dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Uji Tarik Pada Sambungan Las

Diameter shoulder (mm)	Welding speed (mm/menit)	Hasil uji tarik (kN)	Rata – rata (kN)
8	42	3,3	3,23
		3,1	
		3,3	
	55	3,5	3,33
		3,2	
		3,3	
	74	3,4	3,48
		3,5	
		3,55	
10	42	3,8	3,63
		3,5	
		3,6	
	55	4	3,83
		3,7	
		3,8	

Diameter shoulder (mm)	Welding speed (mm/menit)	Hasil uji tarik (kN)	Rata – rata (kN)	
10	74	4,4	4,28	
		4,15		
		4,3		
12	42	3,6	3,57	
		3,5		
		3,6		
	55	3,8	3,45	
		3,6		
		3,65		
	74	74	3,7	3,77
			3,9	
			3,7	

4.2 Pengolahan data hasil penelitian

4.2.1 Menghitung *Ultimate tensil strength*

Tabel 4.2 Data Hasil Uji Tarik Pada Sambungan Las

Diameter shoulder (mm)	Welding Speed (mm/menit)	UTS (MPa)	% Terhadap Logam induk
8	42	86,22	58,25
	55	88,89	60,06
	74	92,89	62,76
10	42	96,89	65,46
	55	102,22	69,07
	74	114,22	77,17
12	42	95,11	64,26
	55	98,22	66,36
	74	100,44	67,86

1. Menghitung luas penampang spesimen

$$l = 12,5 \text{ mm}$$

$$t = 3 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} A &= l \cdot t \\ &= 12,5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \\ &= 37,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

2. Menghitung kekuatan tarik

$$\begin{aligned} \text{Ultimate tensil strength} &= \frac{F_{\max}}{A} \\ &= \frac{3,23 \text{ kN} \times 1000}{37,5 \text{ mm}^2} \\ &= 86,22 \text{ N/mm}^2 = 86,22 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Keterangan : F_{\max} = rata – rata kekuatan tarik tertinggi (kN)

A = luas penampang spesimen uji tarik (mm^2)

4.2.2 Anova

Hipotesa:

H_0 : Tidak ada pengaruh antara diameter *Shoulder* dan *Welding speed* terhadap kekuatan tarik sambungan hasil *friction stir welding* pada Aluminium.

H_1 : Ada pengaruh antara diameter *Shoulder* dan *Welding speed* terhadap kekuatan tarik sambungan hasil *friction stir welding* pada Aluminium.

Data statistika induk dapat kita lihat pada tabel

Tabel 4.3 Data statistika induk perhitungan Anova Kekuatan tarik Rata-rata(MPa)

Variabel	Pengulangan	Welding Speed			Total Baris	
		42	55	74		
Diameter Shoulder	8	1	88	93,33	90,67	810,67
		2	82,67	85,33	93,33	
		3	88	88	94,67	
		Jumlah	258,67	266,67	285,33	
	10	1	101,33	106,67	117,33	940
		2	93,33	98,67	110,67	
		3	96	101,33	114,67	
		Jumlah	290,667	306,67	342,67	
	12	1	96	101,33	98,67	881,33
		2	93,33	96	104	
		3	96	97,33	98,67	
		Jumlah	285,33	294,67	301,33	
	Jumlah	834,67	868	929,33	2632	

$$JKT = 257079,11 - \frac{6892375,11}{27} = 1805,95$$

$$JKB = \left(\frac{2306764,4}{9} \right) - \frac{6892375,11}{9} = 1034,01$$

$$JKK = \left(\frac{2301406,2}{9} \right) - \frac{6892375,11}{9} = 438,65$$

$$JK[BK] = \left(\frac{770672}{3} \right) - 256307,16 - 257711,80 + 255273,15 = 144,85$$

$$JKG = 1805,95 - 1034,01 - 438,65 - 144,85 = 188,44$$

$$\begin{aligned} db_B (\text{BARIS}) &= 3 - 1 = 2 \\ db_K (\text{KOLOM}) &= 3 - 1 = 2 \\ db_{[BK]} (\text{INTERAKSI}) &= 2 \cdot 2 = 4 \\ db_G (\text{GALAT}) &= 3 \cdot 3 \cdot (3-1) = 18 \\ db_T (\text{TOTAL}) &= (3 \cdot 3 \cdot 3) - 1 = 27 \end{aligned}$$

$$KT_B = \frac{931,95}{2} = 465,97$$

$$KT_K = \frac{438,65}{2} = 219,33$$

$$KT_{[BK]} = \frac{128,39}{4} = 32,09$$

$$KT_G = \frac{188,44}{18} = 10,47$$

$$F_B = \frac{517}{10,47} = 49,38$$

$$F_K = \frac{219,33}{10,47} = 20,95$$

$$F_{[BK]} = \frac{36,21}{10,47} = 3,46$$

$$\alpha : 0,05$$

$$F_{B(\text{tabel})} = 3,55$$

$$F_{K(\text{tabel})} = 3,55$$

$$F_{[BK](\text{tabel})} = 2,93$$

Dari perhitungan statistik menggunakan analisa varian dua arah, maka akan didapatkan data seperti yang terlihat pada tabel 4.7

Tabel 4.4 Data statistika induk perhitungan Anova Kekuatan tarik Rata-rata (MPa)

Sumber Keragaman	Jumlah Kuadrat (JK)	derajat bebas (db)	Kuadrat tengah(KT)	f hitung	f tabel
Baris	1034,01	2	517	49,38	3,55
Kolom	438,65	2	219,33	20,95	3,55
Interaksi	144,86	4	36,21	3,46	2,93
Galat	188,44	18	10,47		
Total	1805,96	26			

Kesimpulan:

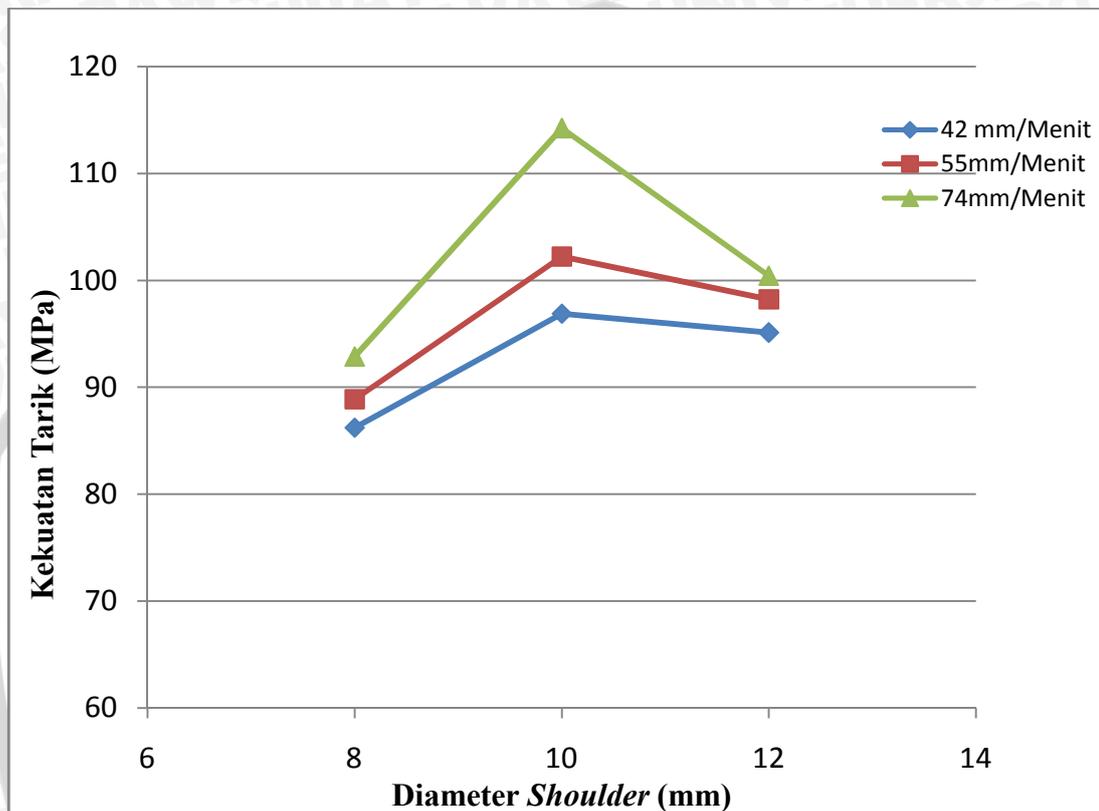
- a. $F_{B \text{ (hitung)}} > F_{B \text{ (tabel)}}$ atau $49,38 > 3,55$. Karena harga $F_{B \text{ (hitung)}}$ lebih besar dari $F_{B \text{ (tabel)}}$ maka H_0 ditolak dan H_1 diterima artinya ada pengaruh antara diameter *shoulder* terhadap kekuatan tarik sambungan hasil *Friction stir welding* pada Aluminium,
- b. $F_{K \text{ (hitung)}} > F_{K \text{ (tabel)}}$ atau $20,95 > 3,55$. Karena harga $F_{K \text{ (hitung)}}$ lebih besar dari $F_{K \text{ (tabel)}}$ maka H_0 ditolak dan H_1 diterima artinya ada pengaruh antara *welding speed* terhadap kekuatan tarik sambungan hasil *Friction stir welding* pada Aluminium.
- c. $F_{[BK] \text{ (hitung)}} > F_{[BK] \text{ (tabel)}}$ atau $3,46 > 2,93$. Karena harga $F_{[BK] \text{ (hitung)}}$ lebih besar dari $F_{[BK] \text{ (tabel)}}$ maka H_0 ditolak dan H_1 diterima artinya ada interaksi pengaruh antara diameter *shoulder* dan *welding speed* terhadap kekuatan tarik sambungan hasil *Friction stir welding* pada Aluminium.



4.3 Pembahasan

4.3.1 Hubungan Antara Diameter *Shoulder* Terhadap Kekuatan Tarik sambungan las pada Aluminium

Data dari tabel 4.1 hasil uji tarik selanjutnya dijadikan grafik garis seperti dibawah ini:



Gambar 4.1 Grafik Hubungan Antara Diameter *Shoulder* Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Aluminium.

Grafik diatas menunjukkan hubungan antara diameter *shoulder* terhadap kekuatan tarik sambungan hasil pengelasan, adapun besarnya diameter *shoulder* yang digunakan adalah 8, 10, dan 12 mm.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa pada *welding speed* 42 mm/menit sambungan las memiliki kekuatan tarik sebesar 86,22 MPa pada diameter 8 mm, kemudian mengalami kenaikan sebesar 10,67 MPa pada diameter *shoulder* 10 mm sehingga kekuatannya menjadi 96,88 MPa akan tetapi mengalami penurunan sebesar 1,78 MPa pada diameter *shoulder* 12 mm sehingga kekuatan sambungan lasnya menjadi 95,11 MPa.

Pada *welding speed* 55 mm/menit sambungan las memiliki kekuatan tarik sebesar 88,88 MPa pada diameter 8 mm, kemudian mengalami kenaikan sebesar 13,33 MPa pada diameter *shoulder* 10 mm sehingga kekuatannya menjadi 102,22 MPa akan tetapi mengalami penurunan sebesar 4 MPa pada diameter *shoulder* 12 mm sehingga kekuatan sambungan lasnya menjadi 98,22 MPa.

Pada *welding speed* 74 mm/menit sambungan las memiliki kekuatan tarik sebesar 92,88 MPa pada diameter 8 mm, kemudian mengalami kenaikan sebesar 21,33 MPa pada diameter *shoulder* 10 mm sehingga kekuatannya menjadi 114,22 MPa akan tetapi mengalami penurunan sebesar 13,78 MPa pada diameter *shoulder* 12 mm sehingga kekuatan sambungan lasnya menjadi 100,44 MPa.

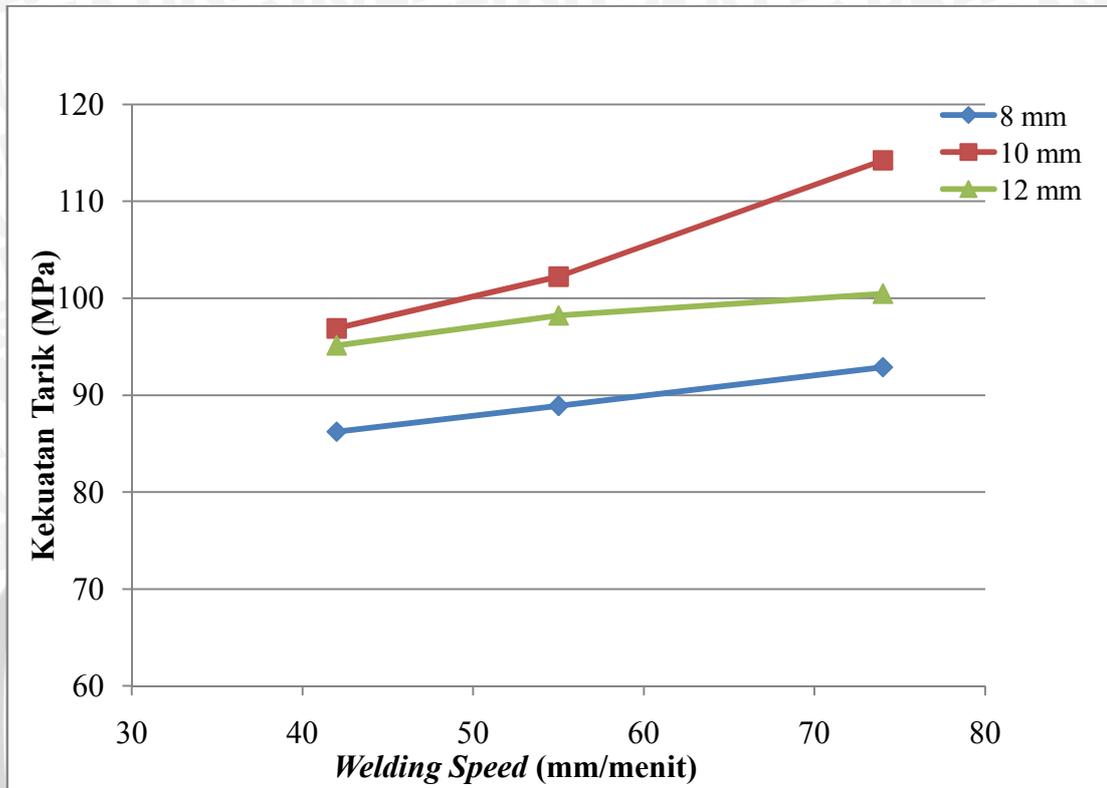
Dari grafik 4.1 diatas menunjukkan bahwa kekuatan tarik meningkat saat dari diameter 8 ke diameter 10 kemudian turun pada diameter 12, hal ini disebabkan pada saat pengelasan menggunakan diameter *shoulder* 8 bidang kontak *shoulder* terlalu kecil sehingga panas yang dihasilkan tidak cukup untuk pemanasan awal dan pelunakan logam induk, sehingga sambungan las yang terbentuk tidak sempurna. Pada diameter *shoulder* 10 kekuatan tarik sambungan mengalami peningkatan hal ini karena dengan bertambahnya bidang kontak *shoulder* yang bersentuhan dengan logam induk maka panas yang dihasilkan akan semakin besar dan menghasilkan panas yang cukup untuk melunakan logam induk, sehingga lasan yang dihasilkan lebih baik. Hal ini sesuai dengan rumus:

$$Q_{Shoulder} = \frac{2}{3} \pi \cdot \omega \cdot \tau_{Contact} \cdot (R_{Shoulder}^3 - R_{Probe}^3)$$

Keterangan	$Q_{Shoulder}$ = Panas yang dihasilkan <i>shoulder</i> (Watt)
	ω = Kecepatan putar mesin (rpm)
	$\tau_{Contact}$ = Tegangan geser (Pa)
	$R_{Shoulder}$ = Jari – jari <i>shoulder</i> (m)
	R_{Probe} = Jari – jari <i>shoulder</i> (m)

Akan tetapi pada diameter *shoulder* 12 mengalami penurunan hal ini karena pada diameter *shoulder* 12 panas yang dihasilkan terlalu besar sehingga perubahan fisik atau struktur dari logam induk akibat panas lebih besar yang berakibat berubahnya properti material yang menyebabkan menurunnya kekuatan tarik dari Aluminium.

4.3.2 Hubungan Antara *Welding speed* Terhadap Kekuatan Tarik sambungan las pada Aluminium



Gambar 4.2 Grafik Hubungan Antara *Welding speed* Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Aluminium

Grafik diatas menunjukkan hubungan antara *welding speed* terhadap kekuatan tarik sambungan hasil pengelasan, adapun *welding speed* yang digunakan adalah 42, 55, dan 74 mm/menit.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa pada diameter *shoulder* 8 mm kekuatan tarik sebesar 86,22 MPa pada *welding speed* 42 mm/menit kemudian mengalami kenaikan sebesar 2 MPa pada *welding speed* 55 mm/menit menjadi 88,89 MPa dan terus mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya *welding speed*. Pada *welding speed* 74 mm/menit kekuatan pengelasan mengalami kenaikan sebesar 4 MPa dari kecepatan pengelasan 55 mm/menit menjadi sebesar 92,89 MPa.

Pada diameter *shoulder* 10 mm kekuatan tarik sebesar 96,89 MPa pada *welding speed* 42 mm/menit kemudian mengalami kenaikan sebesar 5,33 MPa pada *welding speed* 55 mm/menit menjadi 102,22 MPa dan terus mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya *welding speed*, Pada *welding speed* 74 mm/menit kekuatan pengelasan

mengalami kenaikan sebesar 12 MPa dari kecepatan pengelasan 55 mm/menit menjadi sebesar 114,22 MPa.

Pada diameter *shoulder* 12 mm kekuatan tarik sebesar 95,11 MPa pada *welding speed* 42 mm/menit kemudian mengalami kenaikan sebesar 3,11 MPa pada *welding speed* 55 mm/menit menjadi 98,22 MPa dan terus mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya *welding speed*. Pada *welding speed* 74 mm/menit kekuatan pengelasan mengalami kenaikan sebesar 2,22 MPa dari kecepatan pengelasan 55 mm/menit menjadi sebesar 100,44 MPa.

Dari grafik 4.2 diatas menunjukkan bahwa kekuatan tarik terus meningkat seiring dengan meningkatnya *welding speed*, baik pada diameter *shoulder* 8, 10, maupun 12 mm. Hal ini terjadi karena dengan semakin tingginya *welding speed* maka energi atau heat input yang diterima tiap panjang material akan semakin kecil sehingga perubahan struktur atau properti dari material akibat panas bisa diminimalisir. Hal ini sesuai dengan rumus:

$$HI(\text{Heat Input}) = \frac{PI(\text{Power Input})}{v}$$

Keterangan : PI = Power input (Watt)

V = *Welding speed* (m/menit)

BAB V PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Dari penelitian tentang pengaruh diameter *shoulder* dan *Welding speed* terhadap kekuatan tarik sambungan las Aluminium dengan metode FSW diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Meningkatnya *Welding speed* akan mengakibatkan kekuatan tarik dari sambungan hasil lasan semakin meningkat
2. Penambahan dimensi *shoulder* berpengaruh pada kekuatan tarik hasil lasan, terbukti pada perubahan diameter *shoulder* dari 8 mm ke 10 mm kekuatan tarik hasil lasan meningkat kemudian turun pada diameter 12 mm.
3. Nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada variasi diameter *shoulder* 10 mm dengan kecepatan pengelasan 74 mm/menit sebesar 114,22 MPa atau sebesar 77,17 % dari logam induk dan terendah didapat pada variasi diameter *shoulder* 8 mm dengan kecepatan pengelasan 42 mm/menit yaitu sebesar 86,22 MPa atau sebesar 58,25 % dari logam induk.

5.2 SARAN

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut dengan variasi jenis *pin* dan *shoulder* untuk menjadi pembanding dan mencari kekuatan sambungan yang maksimum.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang hubungan variabel diameter *shoulder* atau *welding speed* terhadap beberapa variabel lain seperti kemiringan *tool* (*tool tilt*), kedalaman *shoulder* (*shoulder plunge*), kedalaman *penetrasi probe* , dll

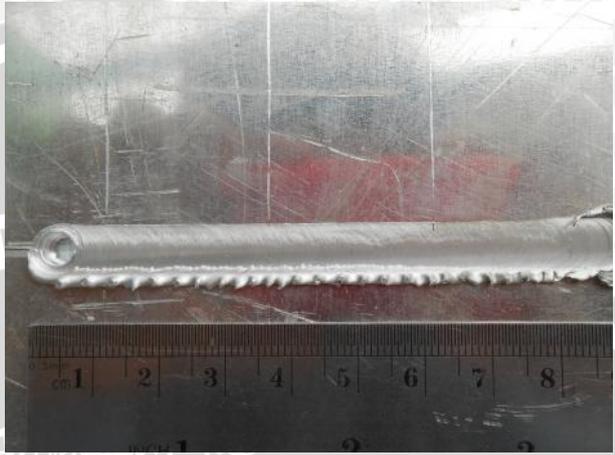
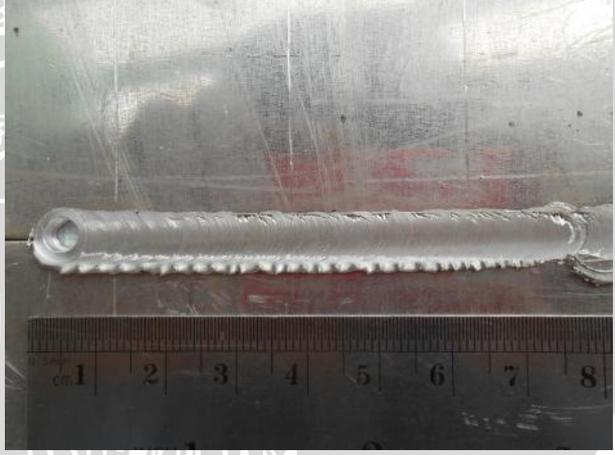
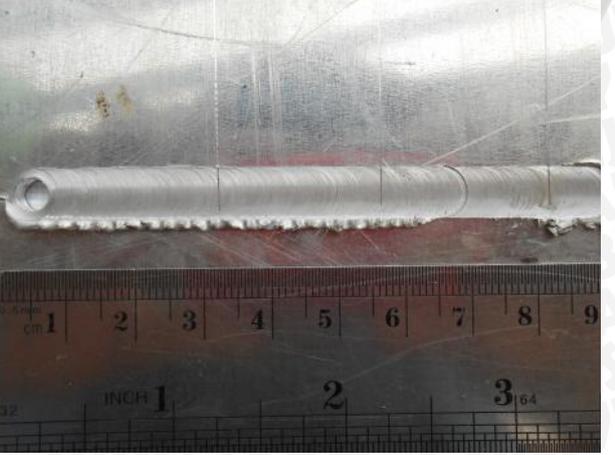


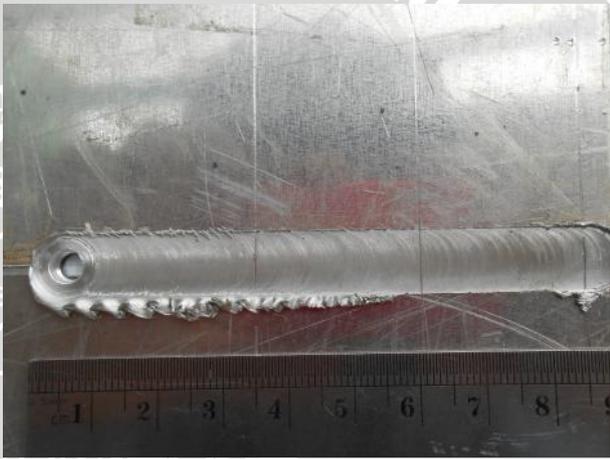
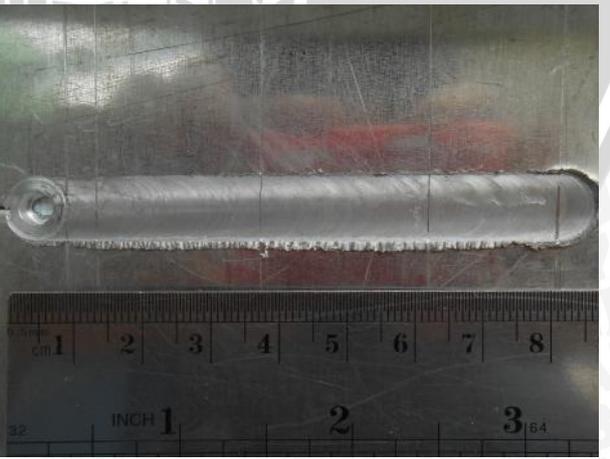
DAFTAR PUSTAKA

- Daniela Lohwasser and Zhan Chen, Friction stir Welding From basics to applications, Woodhead publishing limited, 2009.
- Japan Industrial standard (JIS)
- Khaled, Terry, An outsider looks at friction stir welding, ANM-112N-05-06 juli 2005.
- Megantoro. 2011. Pengaruh Pengelasan Aluminium 5083 terhadap sifat mekanis dan biaya pengelasan dengan perbedaan diameter shoulder pada friction stir welding (FSW), Institut teknologi sepuluh November. Tidak dipublikasikan.
- Nelson, Torque based weld power model for friction stir welding, Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University 2007.
- Rajiv S. Mishra, Murray W. Mahoney, Friction stir welding and processing, editors,p 1-5, 2007.
- Samsi suardi, 2011, Pengembangan Sistem Friction Stir Welding (FSW) Pada Material AC4CH, Universitas Indonesia. Tidak dipublikasikan.
- Surdia, Tata. 1992. Pengetahuan Bahan Teknik, Jakarta: Pradnya Paramita.
- Walpole E. Ronald, "Pengantar statistik", PT Gramedia pustaka utama, Jakarta, 1992.
- Wirjosumarto, H dan Toshie Okumura, "Teknologi Pengelasan Logam", PT Pradnya Paramita, Jakarta, 1996.
- <http://www.aluminium.matter.org.uk/content.html>.
- <http://www.material.org.uk>
- <http://www.twi.co.uk>
- <http://www.zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3367/html>.

LAMPIRAN

HASIL PENGELASAN

Diameter Shoulder	Welding speed (mm/menit)	Hasil Pengelasan
8 mm	42 mm/menit	 <p>A photograph of a cylindrical metal specimen with a weld bead. A ruler is placed below the specimen for scale, showing centimeter markings from 1 to 8.</p>
	55 mm/menit	 <p>A photograph of a cylindrical metal specimen with a weld bead. A ruler is placed below the specimen for scale, showing centimeter markings from 1 to 8.</p>
	74 mm/menit	 <p>A photograph of a cylindrical metal specimen with a weld bead. A ruler is placed below the specimen for scale, showing centimeter markings from 1 to 9 and inch markings from 1 to 3.</p>

Diameter Shoulder	Welding speed (mm/menit)	Hasil Pengelasan
10 mm	42 mm/menit	 <p>A photograph of a cylindrical metal specimen with a shoulder weld. The weld is visible as a raised, textured ring. A ruler is placed below the specimen for scale, showing a length of approximately 9 cm. The background is a metallic surface with some red markings and a handwritten 'W'.</p>
	55 mm/menit	 <p>A photograph of a cylindrical metal specimen with a shoulder weld. The weld is visible as a raised, textured ring. A ruler is placed below the specimen for scale, showing a length of approximately 8 cm.</p>
	74 mm/menit	 <p>A photograph of a cylindrical metal specimen with a shoulder weld. The weld is visible as a raised, textured ring. A ruler is placed below the specimen for scale, showing a length of approximately 8 cm. The ruler also has an inch scale at the bottom.</p>

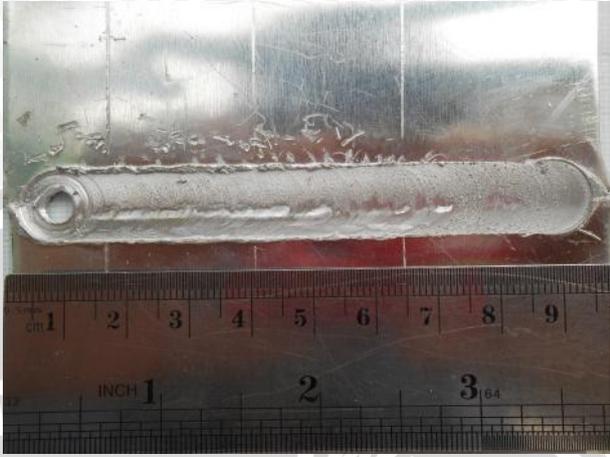
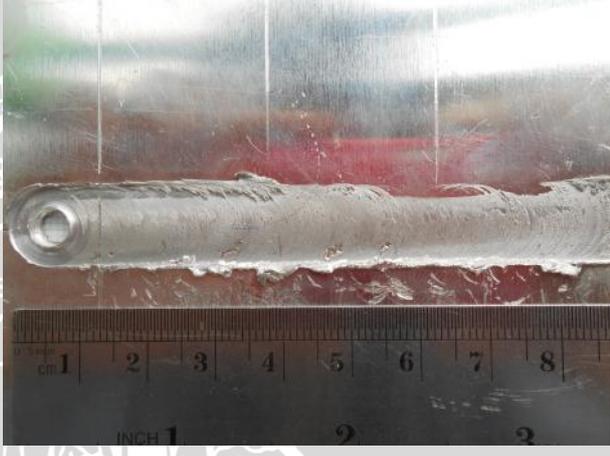
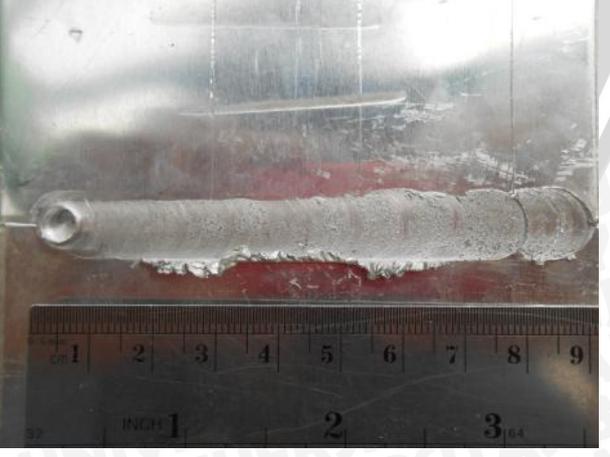
Diameter Shoulder	Welding speed (mm/menit)	Hasil Pengelasan
12 mm	42 mm/menit	 <p>A photograph of a cylindrical metal specimen with a shoulder weld. The weld is visible as a raised, textured line. A ruler is placed below the specimen for scale, showing centimeter and inch markings.</p>
	55 mm/menit	 <p>A photograph of a cylindrical metal specimen with a shoulder weld. The weld appears slightly more irregular than the 42 mm/min specimen. A ruler is placed below for scale.</p>
	74 mm/menit	 <p>A photograph of a cylindrical metal specimen with a shoulder weld. The weld shows significant surface irregularities and a rough texture. A ruler is placed below for scale.</p>

FOTO MIKRO

Logam Induk

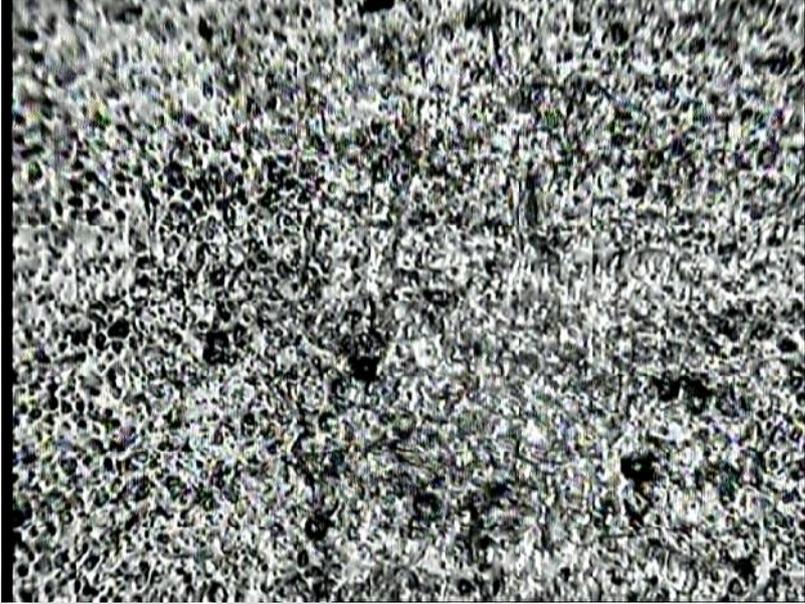
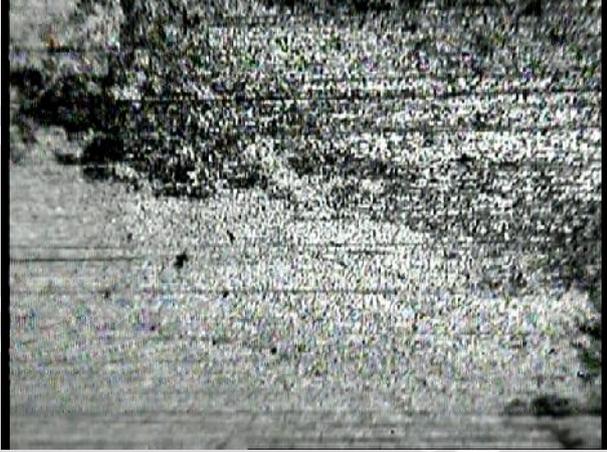
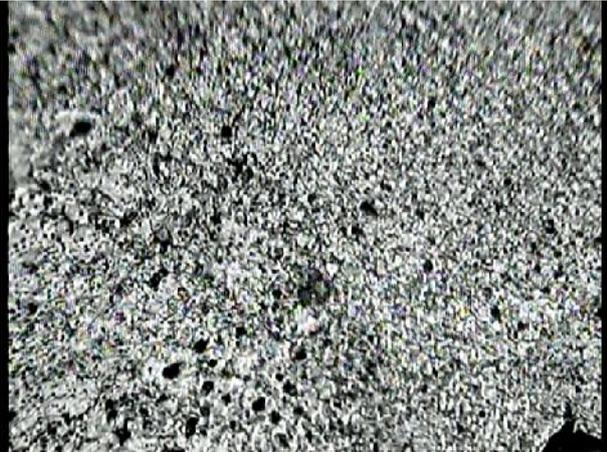
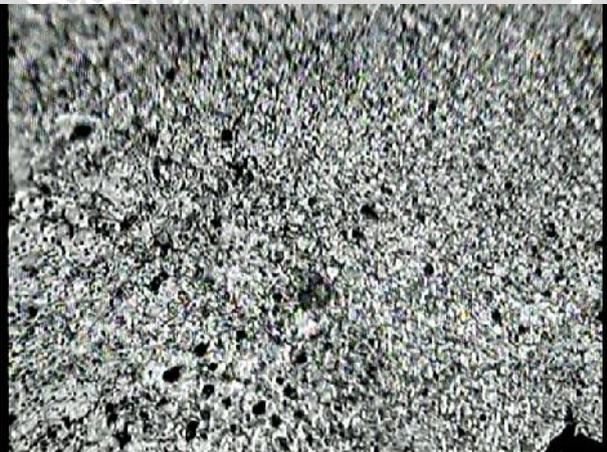
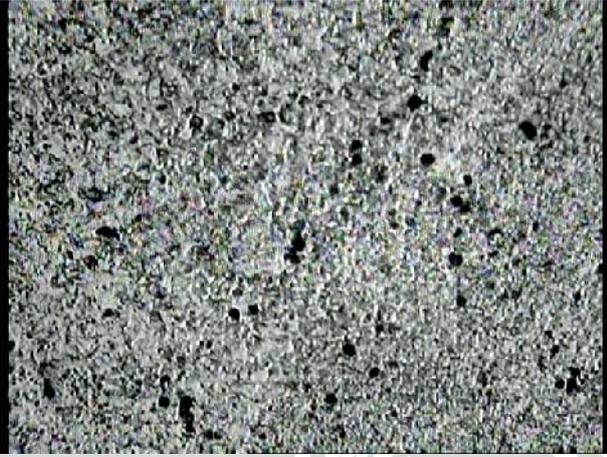
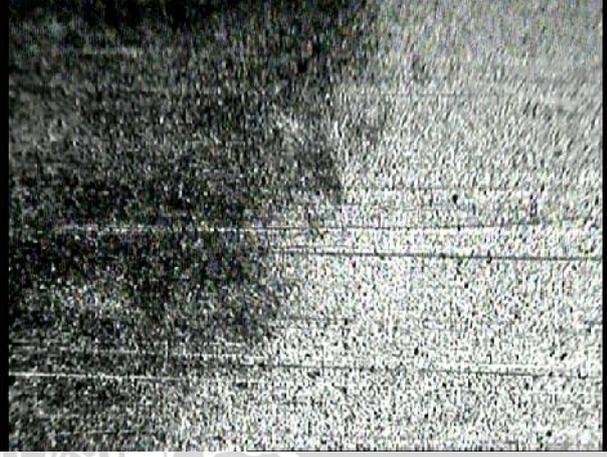
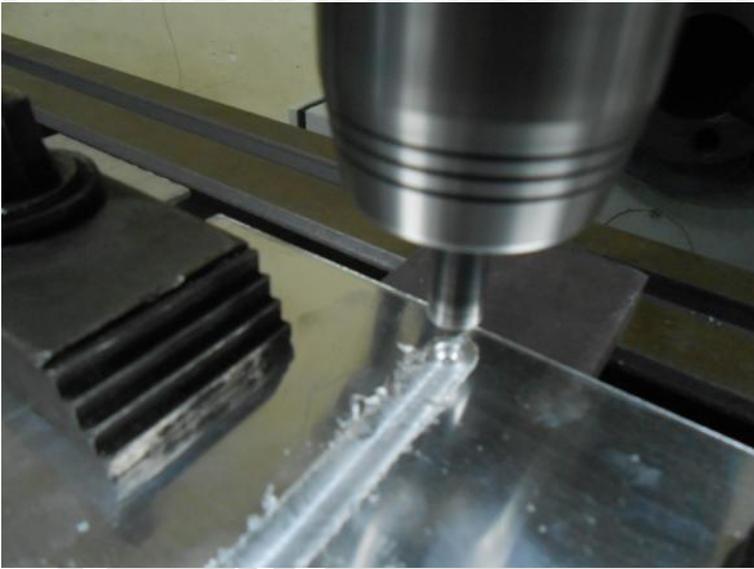


FOTO MIKRO

Diameter Shoulder	Welding speed (mm/menit)	Foto Mikro
	42 mm/menit	
8 mm	55 mm/menit	
	74 mm/menit	

Diameter Shoulder	Welding speed (mm/menit)	Foto Mikro
	42 mm/menit	
10 mm	55 mm/menit	
	74 mm/menit	

DOKUMENTASI KEGIATAN PENELITIAN



Proses pengelesan



Proses pemotongan bahan/material



Proses pemasangan benda kerja



Proses pensettingan benda kerja

BRAWIJAYA

