PENGARUH VARIASI LEBAR CELAH DAN KECEPATAN PUTAR TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN LAS ADUK GESEK (*FRICTION STIR WELDING*) PADA ALUMINIUM

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

ARY WEDIYANTO
NIM. 1110622006-62

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2014

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id

LEMBAR PERSETUJUAN

PENGARUH VARIASI LEBAR CELAH DAN KECEPATAN PUTAR TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN LAS ADUK GESEK (*FRICTION STIR WELDING*) PADA ALUMINIUM

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

ARY WEDIYANTO
NIM. 1110622006-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Ir. Endi Sutikno, MT.	**Purnami, ST., MT.**
NIP. 19590411 198710 1 001	**NIP. 19770707 200812 1 005**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI LEBAR CELAH DAN KECEPATAN PUTAR TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN LAS ADUK GESEK (*FRICTION STIR WELDING*) PADA ALUMINIUM

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

ARY WEDIYANTO
NIM. 1110622006-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 03 Februari 2014

Majelis Penguji

Skripsi I

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

Skripsi II

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

Skripsi III

Khairul Anam, ST., MSc.
NIP. 861127 06 3 1 0032

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT. yang telah senantiasa melimpahkan rahmat, berkah dan karunia -Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul **"Pengaruh Variasi Lebar Celah Dan Kecepatan Putar Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Aduk Gesek (*Friction Stir Welding*) Pada Aluminium"** dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini dapat terselesaikan berkat bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak yang telah banyak membantu proses penyelesaian tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayahnya karena berkatnyalah skripsi ini diberikan kelancaran, kemudahan dan kesempurnaan pada saat proses pembuatan dan pengujiannya.
2. Nabi besar Muhammad SAW
3. Bapak Edy Purnomo, Ibu Sri Masitoh, Arief Dwi Priyanto dan seluruh anggota keluarga yang telah memberikan banyak dukungan baik berupa doa, semangat, materi dan nasehat hingga terselesaikannya penulisan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr.Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
5. Bapak Purnami, ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing II yang dengan sabar memberikan bimbingan dan arahan untuk kesempurnaan penulisan tugas akhir ini.
6. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, MSc. Selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Produksi Jurusan Mesin Fakultas teknik Universitas Brawijaya.
7. Bapak Ir. Endi Sutikno, MT. selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan segala bimbingan, nasehat, pengarahan, motivasi, dan masukan yang telah diberikan.
8. Bapak Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng., Dr.Eng sebagai dosen wali penulis.
9. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang yang bersedia berbagi ilmunya.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

10. Wulan Cahya Ningsih, S.pd terimakasih atas segala motivasi, semangat dan rapalan doa yang senantiasa menghujani keseharianku demi kemudahan-kemudahan yang kudapat hingga aq mampu menyelesaikan skripsiku sekarang.
11. Teman-teman Jurusan Mesin, khususnya keluarga besar SAP 2011, Andika, Riky, Bahar, Rendy dan Teddy serta keluarga besar SAP lainnya, yang telah meminjamkan motor, membagi ilmunya dan banyak membantu pelaksanaan penelitian dan seminar, hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini.
12. Teman-teman Kost Firdaus, ZIM, dan Hariati yang selalu menghibur dan memberikan keceriaan kepada penulis.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa melimpahkan karunia-Nya dan membalas segala amal serta kebaikan pihak-pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan laporan ini dan semoga tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang membutuhkan dan dapat menjadi bahan acuan untuk penelitian lebih lanjut.

Malang, Februari 2014

Penulis

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR ISI

Halaman

PENGANTAR i
DAFTAR ISI iii
DAFTAR TABEL v
DAFTAR GAMBAR vi
DAFTAR LAMPIRAN vii
RINGKASAN viii
BAB I PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 2
1.5 Manfaat Penelitian 2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA
2.1 Penelitian Sebelumnya 3
2.2 Aluminium 3
2.2.1 Klasifikasi Paduan Aluminium 4
2.2.2 Unsur-unsur Paduan Aluminium 6
2.3 Pengertian Pengelasan 7
2.4 Klasifikasi Pengelasan 8
2.5 *Friction Stir Welding* 8
2.6 *Energy Input* 10
2.7 Zona Pengelasan 10
2.8 Profil Sambungan *Friction Stir Welding* 11
2.9 Perencanaan *Tool* (*Tool Design*) 12
2.10 Pengujian Tarik 14
2.11 Anova Dua Jalur (*Two Ways – Anova*) 16
2.12 Hipotesa 19
BAB III METODE PENELITIAN
3.1 Metode Penelitian 20
3.2 Tempat Penelitian 20
3.3 Variabel Penelitian 20

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

3.3.1 Variabel Bebas 20
3.3.2 Variabel Terikat 21
3.3.3 Variabel Terkontrol 21
3.4 Spesifikasi Alat dan Bahan 21
3.4.1 Spesifikasi Alat 21
3.4.2 Bahan Penelitian 23
3.5 Instalasi Penelitian 25
3.6 Prosedur Penelitian 26
3.6.1 Proses Pengelasan 26
3.6.2 Proses Pengujian Kekuatan Tarik 27
3.7 Rancangan Penelitian 27
3.7.1 Analisa Data 28
3.7.2 Analisa Statistik 28
3.7.3 Analisa Grafik 29
3.7.4 Analisa Struktur Mikro 29
3.8 Diagram Alir Penelitian 30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN
4.1 Data Uji Tarik Sambungan Las 31
4.2 Perhitungan Statistik 32
4.2.1 Interval Penduga 32
4.2.2 Anova 32
4.3 Pembahasan 35
4.3.1 Hubungan Antara Lebar Celah dan Kecepatan Putar Terhadap Kekuatan Tarik 35
4.3.2 Analisa Hasil Struktur Mikro 38
BAB V PENUTUP
5.1 Kesimpulan 41
5.2 Saran 41
DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Daftar Statistika Induk	17
Tabel 2.2	Analisa Varian Dua Arah	19
Tabel 3.1	Keterangan Dimensi Benda Kerja Uji Tarik	27
Tabel 3.2	Rancangan Data Pengujian Tarik	28
Tabel 4.1	Data Hasil Uji Tarik Pada Sambungan Las	31
Tabel 4.2	Interval Penduga Kekuatan Tarik	32
Tabel 4.3	Data statistika induk perhitungan Anova Kekuatan Uji Tarik	33
Tabel 4.4	Analisa Varian Dua Arah Kekuatan Tarik Rata-rata	34

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Klasifikasi Cara Pengelasan	8
Gambar 2.2	Skema Pengelasan *Friction Stir Welding*	9
Gambar 2.3	Zona Pengelasan Pada *Friction Stir Welding*	11
Gambar 2.4	Varian Sambungan *Friction Stir Welding*	11
Gambar 2.5	*Tool* Sederhana Pada *Friction Stir Welding*	12
Gambar 2.6	Konfigurasi *Shoulder* dan *Probe*	13
Gambar 2.7	Kurva Tegangan-Regangan	14
Gambar 2.8	Tahapan Terjadinya Perpatahan Ulet Pada Sampel Uji Tarik	15
Gambar 3.1	Mesin Frais (*Milling*)	21
Gambar 3.2	Mesin Uji Tarik	22
Gambar 3.3	*Feeler Gauge*	23
Gambar 3.4	Benda Kerja	24
Gambar 3.5	Dimensi Benda Kerja	24
Gambar 3.6	*Tool* Pengelasan	25
Gambar 3.7	Dimensi *Tool* Pengelasan	25
Gambar 3.8	Instalasi Penelitian	25
Gambar 3.9	Dimensi Benda Kerja Uji Tarik	27
Gambar 3.10	Rancangan Grafik Hubungan Antara Kecepatan Putar dan Lebar Celah Terhadap Kekuatan Tarik	29
Gambar 3.11	Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 4.1	Grafik Hubungan Pengaruh Variasi Lebar Celah dan Kecepatan Putar Terhadap Kekutan tarik Sambungan Las Pada Aluminium	35
Gambar 4.2	Foto Struktur Mikro Dengan Pembesaran 100x Diantara Daerah TMAZ dan HAZ Pada Lebar Celah 0 mm Dengan Kecepatan Putar yang Berbeda	38
Gambar 4.3	Foto Struktur Mikro Dengan Pembesaran 100x Diantara Daerah TMAZ dan Daerah HAZ Pada Lebar Celah 0,5 mm Dengan Kecepatan Putar yang Berbeda	39
Gambar 4.3	Foto Struktur Mikro Dengan Pembesaran 100x Diantara Daerah TMAZ dan Daerah HAZ Pada Lebar Celah 1 mm Dengan Kecepatan Putar yang Berbeda	39

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel uji T
Lampiran 2 Tabel uji F
Lampiran 3 Hasil Uji EDAX

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

RINGKASAN

Ary Wediyanto, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Februari 2013, *Pengaruh Variasi Lebar Celah Dan Kecepatan Putar Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Aduk Gesek (Friction Stir Welding) Pada Aluminium*, Dosen Pembimbing : Endi Sutikno dan Purnami.

Friction stir welding (FSW) merupakan teknik pengelasan dibawah titik leburnya (*solid-state)*, sehingga sangat baik diterapkan untuk pengelasan logam, khususnya aluminium. 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 *design*, manufaktur, perakitan dan waktu pemiliharaan, biaya-biaya tersebut bisa ditekan akibat berkurangnya jumlah *part* pada konstruksi.

Pada penelitian ini proses *friction stir welding* dikerjakan dengan mesin frais *milling vertikal*. Plat aluminium dengan tebal 3 mm digunakan sebagai sampel dalam penelitian kali ini. Sampel dipotong dengan ukuran 100 x 150 mm, untuk setiap proses pengelasan dua sampel dicekam pada *fixture* dengan konfigurasi *butt joint*. *Welding tool* menggunakan baja HSS dengan diameter *shoulder* 10 mm dan diameter pin 5 mm, dalam proses *set-up* ditentukan *shoulder deep plauge* sebesar 0,2 mm dan *tool inclined angle* 2°. Parameter dalam proses yaitu variasi celah (0 mm, 0,5 mm, dan 1 mm) yang dikontrol menggunakan *feller gauge* dan kecepatan putar (1452 rpm, 1842 rpm, dan 2400 rpm). Sedangkan kecepatan pengelasan (*travel speed*) pada semua perlakuan proses *friction stir welding* ditentukan sama yaitu 55 mm/menit. Beberapa hal yang diamati dalam penelitian kali ini adalah kekuatan tarik maksimum dan foto mikrostruktur.

Dari hasil penelitian ini diperoleh kekuatan tarik tertinggi ditunjukkan pada variasi lebar celah 0 mm, dengan kecepatan putar 1842 rpm, yaitu sebesar 117,78 MPa, sedangkan kekuatan tarik terendah ditunjukkan pada variasi lebar celah 1 mm, dengan kecepatan putar 2257 rpm, yaitu sebesar 71,56 MPa. Sehingga semakin besar kecepatan putar dengan lebar celah yang konstan maka kekuatan tarik maksimumnya akan meningkat dan semakin besar lebar celah dengan kecepatan putar yang konstan maka kekuatan tarik maksimumnya akan menurun.

Kata Kunci: *Friction stir welding*, lebar celah, kecepatan putar, dan kekuatan tarik maksimum.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Industri manufaktur merupakan industri yang berkembang pesat pada saat ini, dengan jumlah persaingan yang ketat dan permintaan yang begitu banyak serta kualitas produk yang harus mendukung menuntut kebutuhan teknik baru untuk dapat meyeimbangi kebutuhan pasar. Teknik pengelasan banyak diaplikasikan dalam proses penyambungan, karena karakteristiknya yang lebih ringan dan prosesnya yang lebih sederhana, sehingga biaya yang diperlukan relatif lebih murah.

Aluminium merupakan penghantar panas yang baik serta mempunyai titik lebur yang rendah, sehingga sangat sulit untuk memanaskan atau mencairkan hanya sebagian dari material tersebut. Oleh kerena itu mampu sifat las alimunium dinilai kurang baik jika dibandingkan dengan baja. Untuk hal itu maka telah ditemukan metode pengelasan yang baru, yaitu pengelasan aduk gesek (*friction stir welding)*.

Pengelasan adu gesek *(friction stir welding)* ditemukan pada tahun 1991, proses pengelasan adukan gesek *(Friction Stir Welding)* dikembangkan, dan dipatenkan oleh The Welding Institute (TWI) di Cambridge, kerajaan Inggris. Mesin las adukan gesek yang pertama kali dibuat dan dijual adalah produksi ESAB Welding and Cutting Products, pada pabrik mereka yang berada di Laxa, Swedia. Pengembangan proses ini, berubah secara signifikan dari gerak putaran konvensional dan gesekan linier yang saling berbalasan, menjadi penyambungan dua buah material dengan media gesek (perkakas las).

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 *energy input* 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 ini pun ramah lingkungan karena tidak ada uap, percikan dan tidak ada silau saat proses berlangsung.

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.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas adalah bagaimana pengaruh variasi lebar celah dan kecepatan putar terhadap kekuatan uji tarik sambungan las aduk gesek *(friction stir welding)* pada aluminium.

1.3 Batasan Masalah

Dalam melakukan penelitian ini dilakukan batasan yaitu

1. Bahan yang digunakan adalah plat aluminium.
2. Tipe sambungan las yaitu *butt join.*
3. Material *tool* yang digunakan adalah HSS dengan diameter *shoulder* 10 mm, diameter *probe* 5 mm dan panjang *probe* 2,5 mm
4. Mesin yang digunakan untuk pengelasan yaitu mesin *milling* universal

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan umum yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan harga kekuatan tarik yang optimal pada variasi kecepatan putar dan lebar celah pada pengelasan aduk gesek *(friction stir welding)*

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan pengaturan kecepatan putar dan variasi lebar celah yang optimal.
2. Mampu menerapkan teori yang didapat dibangku perkuliahan, khususnya pada teknik pengelasan.
3. Dapat dijadikan acuan dan motivasi pembaca agar dapat melakukan penelitian lebih lanjut.
4. Sebagai usaha pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang selalu berkembang tiap tahunnya.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Luckytoardi Megantoro (2011), meneliti tentang pengaruh pengelasan aluminium 5083 terhadap sifat mekanis dan biaya pengelasan dengan perbedaan diameter *shoulder* pada *friction stir welding* (FSW). Hasil yang ditunjukkan setelah dilakukan pengujian radiografi, pengujian tarik, pengujian tekuk dan pengujian kekerasan adalah aluminium 5083 dengan proses *friction stir welding* lebih cocok menggunakan *shoulder* diameter 18 mm, karena persentase jumlah cacat *wormholes* yang dihasilkan kecil sehingga memperoleh kekuatan yang lebih baik daripada *shoulder* diameter 16 dan 20 mm.

Shopiyyuddin (2008), meneliti tentang pengaruh pembentukan sambungan las komposit Al-Si / partikel alumina pada paduan hipoeutektik Al-Si pada proses pengelasan *friction stir welding* (FSW). Hasil yang ditunjukkan adalah kekerasan bagian adukan bertambah tinggi pada paduan AC4C dan menurun pada ADC12 yang masing-masing ditambah 22% Alumina (Al_2O_3) berukuran maksimal sekitar 44 µm.

Dinar Kusuma Wardhani (2011), meneliti tentang pengaruh diameter *shoulder* terhadap metalurgi aluminium 5083 pada proses *friction stir welding* (FSW). Hasil dari pengujian foto makro menunjukkan bahwa terdapat cacat *wormholes* berupa *incomplete penetration* dan luas penampang cacatnya yaitu 0,1974 mm^2 untuk diameter *shoulder* 16 mm; 0,1307 mm^2 untuk diameter *shoulder* 18 mm; dan 0,3303 mm^2 untuk diameter *shoulder* 20 mm.

2.2 Aluminium

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi dan hantaran listrik yang baik. Material ini dipergunakan dalam bidang yang sangat luas, bukan hanya untuk peralatan rumah tangga tetapi juga dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, mobil, kapal laut, kontruksi dan sebagainya.

Aluminium terbagi dalam dua jenis yaitu aluminium cetak atau cor *(cast product)* dan aluminium tempa *(wrought product)*. Aluminium tuang memiliki biaya total yang rendah bila dibandingkan dengan aluminium tempa karena aluminium jenis ini memiliki titik lebur yang rendah, sehingga energi yang dibutuhkan lebih rendah. Namun aluminium tuang memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan

dengan aluminium tempa. 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 sifat utama yaitu:

1. Ringan berat jenis rendah (2,7 gr/cm^3), hanya ⅓ baja
2. *Strength to weight ratio* (kekuatan/berat) : sangat baik
3. Temperatur lebur rendah (660°C), sehingga peralatan peleburan lebih sederhana
4. Sifat mampu cor sangat baik
5. Sifat mampu mesin baik
6. Sifat permukaan baik
7. Ketahanan korosi baik
8. Konduktor panas dan listrik yang baik
9. Mudah dipadu dengan unsur lain untuk menghasilkan sifat yang diinginkan

2.2.1 Klasifikasi Paduan Aluminium

Menurut Tata Surdia (1984:135), paduan aluminium diklasifikasikan dalam berbagai standar oleh berbagai negara di dunia. Saat ini klasifikasi yang sangat terkenal adalah standar *Aluminium Association* di Amerika (AA) yang didasarkan atas standar terdahulu dari Alcoa (*Aluminium Company of America*). Paduan tempaan dinyatakan dengan satu angka atau dua angka "S", sedangkan paduan coran dinyatakan dengan tiga angka "S". Standard AA menggunakan penandaan dengan empat angka sebagai berikut:

1. Angka pertama menyatakan sistem paduan dengan unsur-unsur yang dipadukan atau ditambahkan (1:Al murni; 2:Al-Cu; 3:Al-Mn; 4:Al-Si; 5:Al-Mg; 6:Al-Mg-Si dan 7:Al-Zn).
2. Angka kedua menyatakan kemurnian dalam paduan yang dimodifikasi dan aluminium murni.
3. Angka ketiga dan keempat dimaksudkan untuk tanda Alcoa terdahulu kecuali huruf S. Sebagai contoh 3S sebagai 3003 serta 61 S sebagai 6061.

Berdasarkan klasifikasi di atas, aluminium dapat dikelompokkan menurut jenis paduannya. Sifat aluminium dari berbagai paduan meliputi:

1. Al-Murni

Aluminium murni merupakan aluminium dengan komposisi kadar kemurnian mencapai 99.85 % dan ada juga yang mencapai 99,999 %. Hal ini

menunjukkan sifat-sifat fisik Al dan sifat-sifat mekaniknya. Sifat ketahanan korosi dapat berubah menurut kemurnian aluminium. Untuk kemurnian 99,0 % atau di atasnya dapat bertahan bertahun-tahun, sedangkan untuk hantaran listrik aluminiumnya kira-kira 65 % dari hantaran listrik tembaga.

2. Al-Cu

Tembaga adalah salah satu unsur paduan penting yang digunakan pada Al karena dengan paduan ini akan membentuk *solid-solution strengthening* dan dengan *heat treatment* yang sesuai dapat meningkatkan kekuatannya dengan membentuk *precipitate*. Kelarutan maksimal Cu di dalam Al adalah pada kandungan 5,65 % Cu dengan temperatur berkisar 550 ^{o}C. Kelarutan Cu akan turun sesuai dengan penurunan temperatur. Pada temperatur ruang batas kelarutan Cu di dalam Al adalah kurang dari 0,1 %.

3. Al-Mn

Mangan merupakan unsur yang memperkuat aluminium tanpa mengurangi ketahanan korosinya dan dipakai untuk membuat paduan yang tahan korosi. Sebenarnya paduan Al-1,2%Mn dan Al-1,2%Mn-1,0%Mg dinamakan paduan 3003 dan 3004 yang dipergunakan sebagai paduan tahan korosi tanpa perlakuan panas. (Surdia Tata, 1984 :136-137).

4. Al-Si

Kandungan Si pada aluminium memberikan beberapa keuntungan seperti hasil permukaan yang baik. Paduan Al-Si sangat baik kecairannya dan sangat baik untuk paduan coran (*cast*). Sebagai bahan tambahan, Si mempunyai ketahanan korosi yang baik, ringan, koefisien muai yang kecil dan sebagai penghantar listrik yang baik juga panas koefisien pemuaian termalnya sangat rendah. Oleh karena itu paduan ini mempunyai koefisien yang rendah apabila ditambah Si lebih banyak.

5. Al-Mg

Pengaruh Mg di dalam paduan Al-Mg mempunyai pengaruh yang hampir sama dengan pengaruh Cu di dalam paduan aluminium. 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 dan meningkatkan ketahanan beban kejut atau impak. Magnesium juga memberikan pengaruh buruk yaitu meningkatkan kemungkinan timbulnya cacat pada hasil pengecoran.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

6. Paduan Al-Mg-Si

Paduan Al, Si dan Mg membentuk senyawa Magnesium Silikat (MgSi) yang akan membentuk eutektik pada sistem paduan $AlMg_2Si$. Paduan dalam sistem ini mempunyai kekuatan yang kurang sebagai bahan tempaan dibandingkan dengan paduan-paduan lainnya tetapi sangat liat, sangat baik untuk ekstrusi, sangat baik untuk mampu bentuk yang tinggi pada temperatur biasa, tahan korosi dan sebagai tambahan dapat diperkuat dengan perlakuan panas setelah pengerjaan (Surdia Tata, 1984 :140).

7. Paduan AL-Zn

Paduan ini lebih banyak mengandung aluminium dan merupakan memiliki ketahanan korosi yang baik. Dalam penggunaannya biasa diaplikasikan untuk konstruksi tempat duduk pesawat terbang, perkantoran dan konstruksi lainnya yang membutuhkan perbandingan antara ketahanan korosi dan berat yang tidak terlalu besar.

2.2.2 Unsur-unsur Paduan Aluminium

Aluminium murni mempunyai kemurnian hingga 99,96% dan minimal 99%. Zat pengotornya berupa unsur Fe dan Si. Aluminium paduan memiliki berbagai kandungan atom-atom atau unsur-unsur utama (mayor) dan minor. Unsur mayor seperti Mg, Mn, Zn, Cu, dan Si sedangkan unsur minor seperti Cr, Ca, Pb, Ag, Fe, Sn, Zr, Ti, Sn, dan lain-lain. Unsur- unsur paduan yang utama dalam aluminium antara lain:

a. Silikon (Si)

Dengan atau tanpa paduan lainnya, silikon mempunyai ketahanan terhadap korosi. Bila dipadukan dengan aluminium akan mempunyai kekuatan yang tinggi setelah perlakuan panas. Kelemahannya adalah silikon mempunyai kualitas pengerjaan mesin yang jelek, dan ketahanan koefisien panas yang rendah.

b. Tembaga (Cu)

Dengan unsur tembaga pada aluminium akan meningkatkan kekerasan dan kekuatannya. Hal ini disebabkan karena tembaga dapat memperhalus struktur butir dan akan mempunyai kualitas pengerjaan mesin, dan keuletan yang baik, mampu tempa, dan mudah dibentuk.

c. Magnesium (Mg)

Dengan menambahkan unsur magnesium, aluminium akan mempunyai sifat ketahanan korosi dan kualitas pengerjaan mesin yang baik. Penambahan

magnesium dapat meningkatkan sifat mampu las dan meningkatkan kekuatan aluminium.

d. Mangan (Mn)

Menambahkan mangan dapat meningkatkan sifat mampu bentuk pada aluminium. Selain itu, mangan juga akan meningkatkan titik lebur paduan aluminium sehingga sifat dan mampu lasnya baik.

e. Seng (Zn)

Umumnya seng ditambahkan bersama-sama dengan unsur tembaga dalam persentase kecil. Dengan penambahan ini akan meningkatkan sifat-sifat mekanik pada perlakuan panas juga kemampuan mesin.

f. Besi (Fe)

Penambahan unsur Fe dimaksudkan untuk mengurangi penyusutan. Tetapi penambahan Fe yang besar akan menyebabkan struktur perubahan butir yang kasar, namun hal ini dapat diperbaiki dengan Mg atau Cr.

g. Titanium (Ti)

Titanium dapat meningkatkan sifat mampu mesin pada aluminium. Penambahan titanium pada aluminium dimaksudkan untuk mendapatkan struktur butir yang halus. Biasanya penambahannya bersamaan dengan Cr dalam persentase 0,1%.

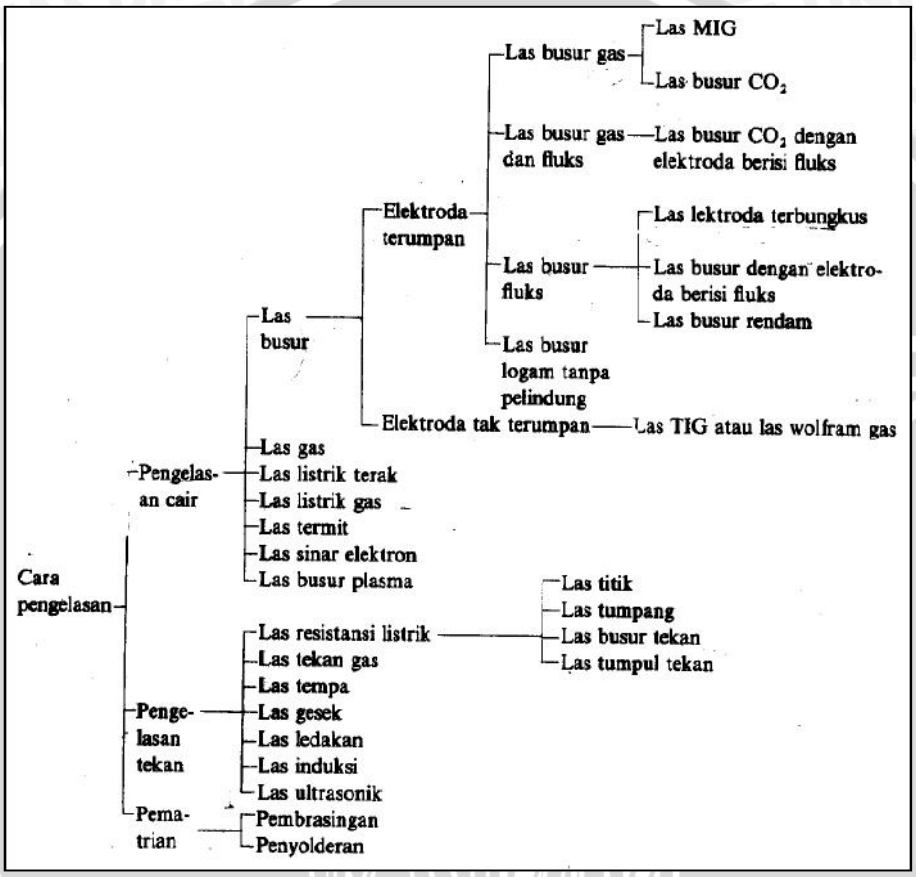
2.3 Pengertian Pengelasan

Pengelasan merupakan suatu proses untuk menyambungkan dua buah batang logam atau plat logam pada proses pembuatan suatu kontruksi, baik konstruksi bangunan atau kostruksi mesin. Pada saat ini teknologi pengelasan sudah sangat luas digunakan dalam bidang teknik, karena sambungan dengan cara pengelasan lebih ringan, ringkas dan murah biaya.

Berdasarkan pengertian dari Deutche Industrie Normen (DIN), las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan cair. Teknik pengelasan secara sederhana telah ditemukan dalam rentang waktu antara 4000 sampai 3000 SM. Setelah energi listrik dipergunakan dengan mudah, teknologi pengelasan maju dengan pesatnya sehingga menjadi suatu teknik penyambungan yang mutakhir. Hingga saat ini telah dipergunakan lebih dari 40 jenis pengelasan.

2.4 Klasifikasi Pengelasan

Sampai saat ini banyak sekali cara-cara pengklasifikasian yang digunakan dalam bidang las, hal ini disebabkan karena perlu adanya kesepakatan dalam hal-hal tersebut. Berdasarkan cara kerjanya, klasifikasi pengelasan dapat dibagi dalam tiga kelas utama yaitu pengelasan cair, pengelasan tekan, dan pematrian. Untuk lebih jelasnya klasifikasi cara pengelasan dapat dilihat pada gambar 2.1 di bawah ini.



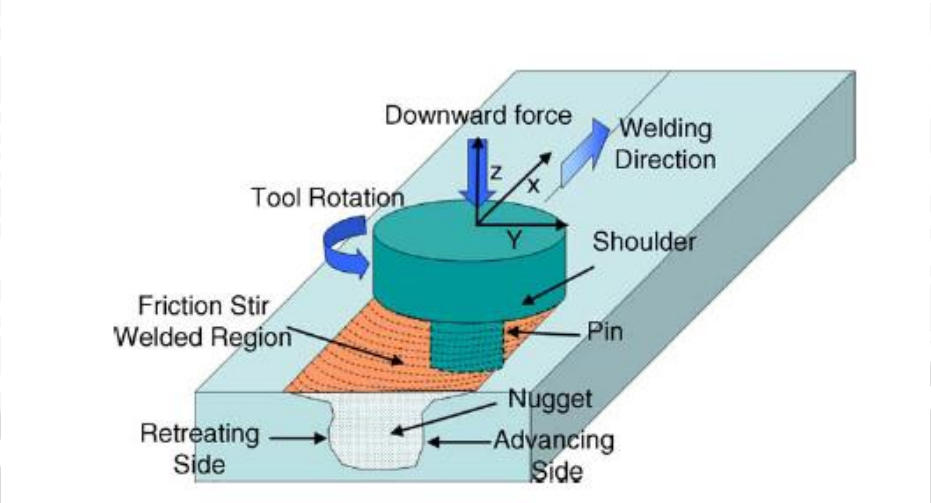
Gambar 2.1 Klasifikasi Cara Pengelasan
Sumber: Wiryosumarto, 1994: 8

2.5 *Friction Stir Welding*

Friction stir welding (FSW) merupakan salah satu teknik pengelasan baru yang diciptakan oleh The Welding Institut (TWI), Cambridge, Inggris. FSW termasuk pengelasan tanpa bahan tambah dan suhu kerjanya tidak melewati titik lebur benda kerja dan digunakan untuk aplikasi dimana kebutuhan akan perubahan karakteristik dasar benda kerja bisa diminimalisir sekecil mungkin.

Dalam FSW, tool pengelasan dengan atau tanpa profil pada *probe* berputar dan bergerak dengan kecepatan konstan sepanjang alur sambungan antara dua material yang akan disambung. 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 dari pada tebal benda kerja dan *shoulder* dari *tool* harus bersentuhan dengan permukaan benda kerja untuk menghasilkan panas.



Gambar 2.2 Skema Pengelasan *Friction Stir Welding*
Sumber: Samsi Suardi, 2011 : 6

Gesekan panas 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 akan menyebabkan material yang diaduk akan melunak tanpa melewati titik leburnya. Hal ini 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.

Untuk mendapatkan hasil las yang optimal, bahan dan bentuk punggung serta pin didesain sedemikian rupa. Bahan perkakas las yang digunakan tergantung kepada logam yang akan disambung. Perkakas las berbahan seperti baja kecepatan tinggi (HSS), baja perkakas H13, dan D3 digunakan untuk menyambung logam aluminium, magnesium dan tembaga. Sedangkan paduan tungsten seperti tungsten karbida (WC), tungsten rehenium (W-25%Re) dan *polycrystal cubic boron nitrate* (PCBN) digunakan untuk menyambung logam yang lebih keras seperti baja, nikel dan titanium. Bentuk perkakas las juga bervariasi seperti punggung rata, bergelombang dan mangkok terbalik dikombinasikan dengan pin berbentuk silinder, kerucut dan oval dengan permukaan rata, ulir dan kombinasinya. Terdapat beberapa keuntungan dari FSW dibandingkan pengelasan yang lain, diantaranya adalah:

1. Tidak terjadi pelelehan selama pengelasan
2. Bisa mengelas semua jenis aluminium
3. Tidak memerlukan bahan pengisi
4. Tidak menimbulkan gas
5. *Tool welding* dapat digunakan berulang-ulang
6. Ramah lingkungan (*low flame*)
7. Energi yang dibutuhkan untuk pengelasan lebih rendah dari fusion welding.

2.6 *Energy Input*

Dalam proses pengelasan merupakan satu hal yang sangat penting untuk memperkirakan jumlah kalor yang dihasilkan, pada pengelasan *friction stir welding* panas yang dihasilkan berasal dari tool pengelasan yang bergesekan dengan benda kerja. Meskipun masih memiliki kelemahan dari beberapa faktor yang tidak diperhitungkan diantaranya *welding speed* dan *heat losses*, persamaan *heat input* akibat gesekan antara tool pengelasan dan benda kerja adalah sebagai berikut:

$$Q = \frac{2}{3}®.\mu.²_{contact}(R^3{}_{shoulder} + 3R^2{}_{probe}.H_{probe}) \qquad \text{(D. Lohwasser, Hal: 280)} \qquad (2.1)$$

Keterangan:

Q = Panas Total yang Dihasilkan (J/s)

ω = Kecepatan Putar (rpm)

$R_{shoulder}$ = Jari-jari *Shoulder* (m)

R_{probe} = Jari-jari *Probe* (m)

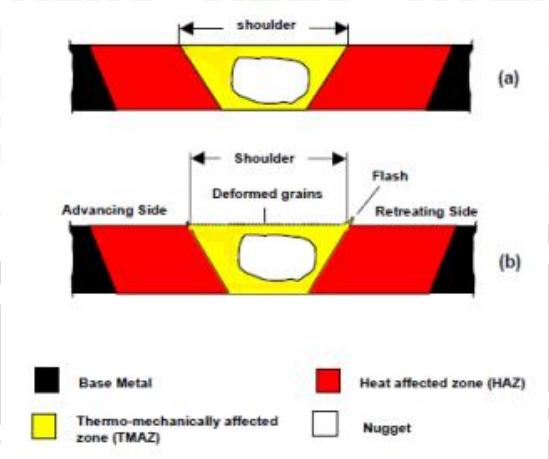
H_{probe} = Tinggi *Probe* (m)

$\tau_{contact}$ = $\tau_{contact}$ untuk Aluminium = 20 MPa (D. Lohwasser, Hal:281)

2.7 Zona Pengelasan

Berdasarkan TWI (TWI website *www.twi.co.uk*) profil umum dari sambungan butt berupa 4 zona trapezoid. Zona pertama adalah *unaffected base metal*, di mana pada zona tersebut tidak terjadi perubahan struktur mikro atau sifat dari material. Zona yang kedua adalah *Heat Affected Zone* (HAZ), di mana 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

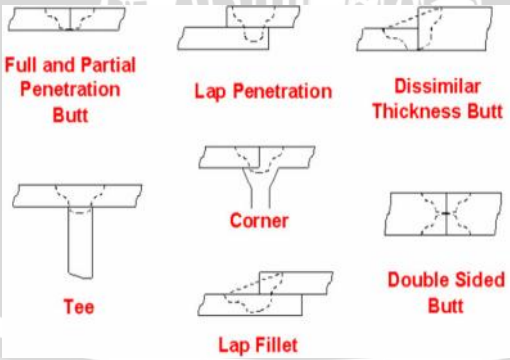
panas. Zona yang terakhir adalah *nugget* yang merupakan area rekristalisasi dari TMAZ. Beberapa orang menyebut *nugget* sebagai *stir zone* (SZ). (Khaled, Terry, 2005: 12)



Gambar 2.3 Zona Pengelasan Pada *Friction Stir Welding*
Sumber: Khaled, Terry, 2005: 12

2.8 Profil Sambungan *Friction Stir Welding*

Pengelasan adukan gesek secara umum dapat dilakukan dengan dua cara, yakni sambungan temu *(Butt Joint)* dan sambungan tumpang tindih *(Lap Joint).* Namun pada perkembangannya las adukan gesek dapat dilakukan dengan beberapa variasi sambungan, di antaranya; sambungan temu dengan ketebalan berbeda *(Dissimilar Thickness Butt),* sambungan tegak lurus *(Tee),* sambungan sudut *(Corner),* sambungan pengisian tumpang tindih *(Lap Fillet),* dan sambungan temu ganda *(Double Sided Butt).*



Gambar 2.4 Varian Sambungan *Friction Stir Welding*
Sumber: Samsi Suardi, 2011 : 6

Pada dunia industri dan penelitian, mayoritas fokus dalam mengembangkan pengelasan sambungan temu (*butt joint*) untuk aluminium lembaran dan pelat sampai tebal 3 inch. FSW juga digunakan untuk membuat butt antara logam dengan ketebalan

yang berbeda. FSW dapat dilakukan di semua posisi *(horizontal, vertikal, overhead dan orbital).* FSW dapat berproduksi di industri otomotif secara umum dan industri pesawat terbang secara khususnya. (Samsi Suardi, 2011 : 6)

Pengembangan FSW pada industri otomotif dan pesawat terbang sangat pesat karena dapat mereduksi berat total dari konstruksi. Pengurangan berat bisa berasal dari jumlah 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 stres yang lebih rendah di area sambungan dibandingkan dengan aplikasi *fastener*. Di samping itu dapat memperbaiki sifat korosif dengan mengurangi *fastener* yang merupakan sumber utama dari kontak metal berbeda jenis. Penghematan terakhir berasal dari hilangnya biaya untuk keperluan *sealent, locking compound* dan sejenisnya. Berikut adalah contoh pengaplikasian FSW di bidang industri:

1. *Platform* pendaratan helikopter
2. Tangki bahan bakar pada pesawat
3. Tangki oksigen pada pesawat luar angkasa
4. Gerbong kereta api berkecepatan tinggi
5. Body dari kendaraan bermotor

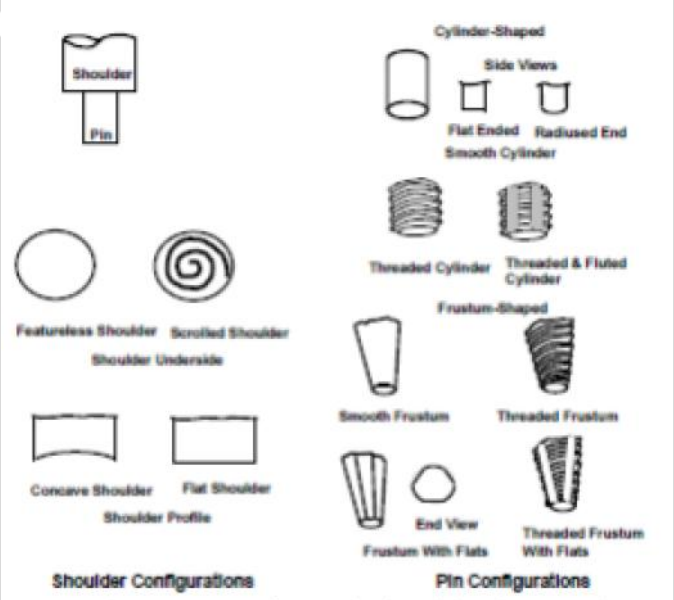
2.9 Perancangan Tool (*Tool Design*)

Pada awal penemuan *friction stir welding*, *tool* yang digunakan masih berupa satu silinder utuh dengan bentuk *probe* silinder sederhana. Bentuk *probe* yang sederhana hanya bisa menghasilkan *flow material* dan pencampuran yang terbatas, akibatnya kecepatan pengelasan yang dihasilkan juga rendah. (Khaled, Terry, 2005: 13)

Gambar 2.5 Tool Sederhana Pada *Friction Stir Welding*
Sumber: www.msm.cam.ac.uk

Salah satu lembaga yang terus mengembangkan rancangan *tool* adalah TWI. *Probe* berulir diciptakan untuk membantu memastikan deformasi yang terjadi pada benda kerja tersebar secara sempurna di seputar *probe* dan dari sisi atas menuju sisi bawah. Hal ini memungkinkan percampuran material dilakukan pada putaran yang lebih tinggi dan menghasilkan kualitas yang lebih baik karena bisa mereduksi kekosongan sambungan. (Khaled, Terry, 2005: 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*. (Khaled, Terry, 2005: 13)



Gambar 2.6 Konfigurasi *Shoulder* dan *Probe*
Sumber: Khaled, Terry, 2005: 13

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 berbasic *nickel alloy* (Khaled, Terry, 2005: 13).

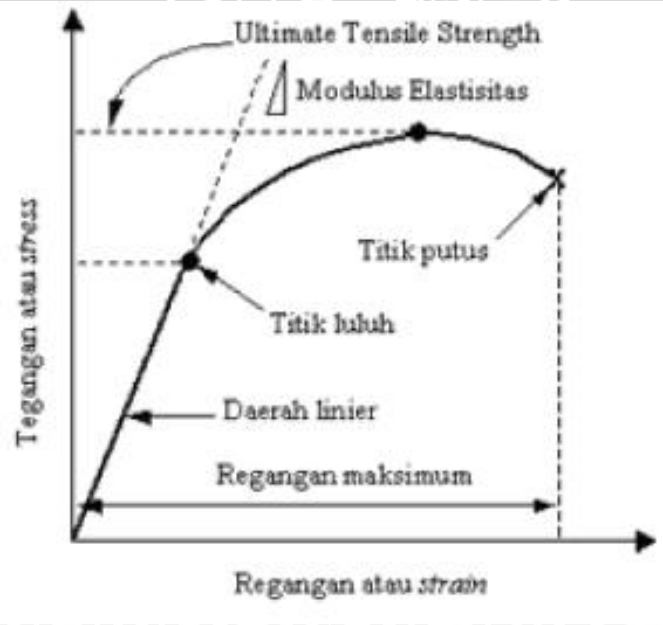
Perancangan *tool* merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi struktur mikro, profil dan sifat mekanik sambungan. Material *tool* merupakan faktor

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

2.10 Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik berfungsi untuk mengetahui kekuatan tarik benda uji. Pengujian kekuatan tarik daerah las dimaksudkan untuk mengetahui apakah kekuatan las mempunyai 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 di mana letak putusnya suatu sambungan las.

Pengujian tarik adalah pengujian yang diberikan kepada benda uji dengan memberikan gaya tarik berlawanan arah pada salah satu ujung benda uji. Gaya tersebut mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi) pada benda uji tersebut. Proses terjadinya deformasi pada benda uji adalah proses pergeseran butiran kristal logam yang mengakibatkan melemahnya gaya elektromagnetik setiap atom logam hingga lepas 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

Dalam pengujian tarik benda uji mengalami perlakuan tertentu yang berkaitan dengan tegangan. Secara matematik tegangan tarik dapat ditulis sebagai berikut:

$$\pm = \frac{P}{A_o}(kg/mm^2) \qquad \text{(Wiryosumarto, 2000: 181)} \qquad (2.2)$$

Keterangan :

σ = Tegangan (kg/mm^2)

P = Beban tarik (kg)

Ao = Luas penampang spesimen mula (mm^2)

Regangan yang didapatkan adalah regangan linear rata-rata, yang diperoleh dengan cara membagi perpanjangan benda uji dengan panjang awal. Sedangkan regangan (persentase pertambahan panjang) pada saat itu dapat dirumuskan sebagai berikut:

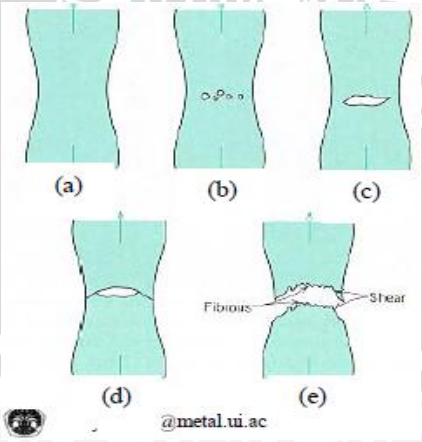
$$£ = \frac{(L - L_o)}{L_o} x100\% \qquad \text{(Wiryosumarto, 2000: 181)} \qquad (2.3)$$

Keterangan :

ε = Regangan (%)

Lo = Panjang batang uji mula (mm)

L = Panjang batang uji akhir (mm)



Gambar 2.8 Tahapan Terjadinya Perpatahan Ulet Pada Sampel Uji Tarik
(a) Penyempitan awal; (b)pembentukan rongga-rongga kecil (cavity); (c) Penyatuan rongga-rongga membentuk suatu retakan; (d) Perambatan retak; (e) Perpatahan geser akhir pada sudut 45°
Sumber: www.msm.cam.ac.uk

Pembebanan tarik dilakukan terus menerus dengan menambahkan beban sehingga akan mengakibatkan perubahan bentuk pada benda berupa pertambahan panjang dan pengecilan luas permukaan dan akan mengekibatkan kepatahan pada beban. Persentase pengecilan yang terjadi dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$q = \frac{(A_0 - A_{11})}{A_0} x100\% \qquad \text{(Wiryosumarto, 2000: 181)} \qquad (2.4)$$

Keterangan :

q = Reduksi Penampang (%)

Ao = Luas penampang mula (mm^2)

A_1 = Luas penampang akhir (mm^2)

2.11 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	Lebar Celah (mm)			Total Baris
			B_1 (0)	B_2 (0,5)	B_3 (1)	
Kecepatan Putar (rpm)	A_1 (1452)	1	X_{111}	X_{121}	X_{131}	
		2	X_{112}	X_{122}	X_{132}	
		3	X_{113}	X_{123}	X_{133}	
	Jumlah					
	A_2 (1842)	1	X_{211}	X_{221}	X_{231}	
		2	X_{212}	X_{222}	X_{232}	
		3	X_{213}	X_{223}	X_{233}	
	Jumlah					
	A_3 (2257)	1	X_{311}	X_{321}	X_{331}	
		2	X_{312}	X_{322}	X_{332}	
		3	X_{313}	X_{323}	X_{333}	
	Jumlah					
Jumlah Total						

5. Hitunglah jumlah kuadrat total (JKT)

$$\text{JKT} = \sum_{i=1}^{r} . \sum_{j=1}^{c} . \sum_{k=1}^{n} .x_{ijk}^{2} - \frac{T^{2}...}{\text{rcn}} \qquad \text{(Ronald E. Wapole, Hal: 410)} \qquad (2.5)$$

6. Hitunglah jumlah kuadrat antar baris (JKB)

$$\text{JKB} = \frac{\sum_{i=1}^{r} T^{2}...}{cn} - \frac{T^{2}...}{rcn} \qquad \text{(Ronald E. Wapole, Hal: 410)} \qquad (2.6)$$

7. Hitunglah jumlah kuadrat antar kolom (JKK)

$$\text{JKK} = \frac{\sum_{j=1}^{c} T^{2}.j.}{rn} - \frac{T^{2}...}{rcn} \qquad \text{(Ronald E. Wapole, Hal: 410)} \qquad (2.7)$$

8. Hitunglah jumlah kuadrat bagi interaksi JK(BK)

$$\text{JK(BK)} = \frac{\sum_{i=1}^{r} \sum_{j=1}^{c} T^{2}ij.}{n} - \frac{\sum_{i=1}^{r} T^{2}i..}{cn} - \frac{\sum_{j=1}^{c} T^{2}.j.}{rn} + \frac{T^{2}...}{rcn} \qquad (2.8)$$

(Ronald E. Wapole, Hal: 410)

9. Hitunglah jumlah kuadrat galat (JKG)

JKG = JKT – JKB – JKK – JK(BK) (Ronald E. Wapole, Hal: 410) (2.9)

10. Mencari derajat bebas (dbr; dbc_B; dbrc; dbd; dbt)

$dbr_{(BARIS)}$	= r-1	(Ronald E. Wapole, Hal: 409)	(2.10)
$dbc_{(KOLOM)}$	= c-1	(Ronald E. Wapole, Hal: 409)	(2.11)
$dbrc_{(INTERAKSI)}$	= (dbr) . (dbc)	(Ronald E. Wapole, Hal: 409)	(2.12)
$dbd_{(RESIDU)}$	= rcn – (r.c)	(Ronald E. Wapole, Hal: 409)	(2.13)
$dbt_{(TOTAL)}$	= rcn-1	(Ronald E. Wapole, Hal: 409)	(2.14)

11. Menghitung Kuadrat Tengah ($S_1^2, S_2^2, S_3^2, S_4^2$)

$$S_1^2 = \frac{JKB}{r-1}$$ (Ronald E. Wapole, Hal: 409) (2.15)

$$S_2^2 = \frac{JKK}{c-1}$$ (Ronald E. Wapole, Hal: 409) (2.16)

$$S_3^2 = \frac{JK(BK)}{(c-1).(r-1)}$$ (Ronald E. Wapole, Hal: 409) (2.17)

$$S_4^2 = \frac{JKG}{rcn-(r.c)}$$ (Ronald E. Wapole, Hal: 409) (2.18)

12. Carilah F_{hitung} (F_1; F_2; F_3) masing-masing group.

$$F_1 = \frac{S_1^2}{S_4^2}$$ (Ronald E. Wapole, Hal: 409) (2.19)

$$F_2 = \frac{S_2^2}{S_4^2}$$ (Ronald E. Wapole, Hal: 409) (2.20)

$$F_3 = \frac{S_3^2}{S_4^2}$$ (Ronald E. Wapole, Hal: 409) (2.21)

13. Tentukan taraf signifikannya, misalnya α = 0,05 atau α = 0,01
14. Cari Ftabel (F_1; F_2; F_3) masing-masing group.

$F_{1(tabel)} = F_{1\ (\alpha)\ (dbr:dbd)}$

$F_{2(tabel)} = F_{2\ (\alpha)\ (dbc:dbd)}$

$F_{3(tabel)} = F_{3\ (\alpha)\ (dbrc:dbd)}$

15. Buatlah tabel ringkasan anova

Tabel 2.2 Analisa Varian Dua Arah

Sumber Keragaman	Jumlah Kuadrat (JK)	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	F_{hitung}	F_{tabel}
Nilai Tengah Baris					
Nilai Tengah Kolom					
Interaksi					
Galat					
Total					

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

2.12 Hipotesa

Besarnya variasi lebar celah dan kecepatan putar mempengaruhi kekuatan tarik sambungan las aduk gesek (*friction stir welding)* pada aluminium. Semakin besar kecepatan putar pada pengelasan akan mengakibatkan gesekan yang terjadi antara *shoulder* dan logam induk semakin besar, sehingga *heat input* yang dihasilkan akan semakin besar. *Heat input* yang besar akan mengakibatkan perubahan fisik atau struktur dari material, sehingga kekuatan tariknya menurun. Sedangkan semakin besar lebar celah yang diberikan maka gesekan antara *tool welding* dan material akan semakin kecil. Hal ini terjadi akibat bidang kontak yang bergesekan semakin sedikit sehingga panas yang dihasilkan akan semakin sedikit. Namun lebar celah yang terlalu besar mengakibatkan proses pengadukan yang kurang sempurna akibat jarak yang terlalu jauh sehingga mengakibatkan kekuatan tarik sambungan las aluminium menurun.

BAB III
METODELOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *(true experimental researce)* experimental nyata dan secara lansung pada objek yang dituju bertujuan untuk mengetahui pengaruh lebar celah dan kecepatan putar ada pengelasan FSW *(Friction Stir Welding)* terhadap kekuatan tarik hasil las aluminium. Disamping itu juga dilakukan pengkajian terhadap dasar teori yang ada dari sumber literatur beberapa buku dan jurnal.

3.2 Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan 30 Oktober – 21 Desember 2013. Tempat yang digunakan untuk penelitian yaitu:

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

3.3 Variabel Penelitian

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

3.3.1 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 dalam penelitian ini adalah :

- Lebar celah: 0; 0,5; 1 mm
- Kecepatan putar: 1452, 1842, 2257 rpm

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

3.3.2 Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang besarnya bergantung pada variabel bebas yang diberikan. Adapun variabel yang terikat dalam penelitian ini adalah kekuatan tarik.

3.3.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian. Variabel yang dijaga konstan selama penelitian ini adalah kecepatan tempuh (travel speed) yaitu 55 mm/menit, *Shoulder Deep Plauge* 0,2 mm dan *Tool Inclined Angle* 2°.

3.4 Spesifikasi Alat dan Bahan

Secara garis besar peralatan penelitian yang harus dipersiapkan adalah, mesin frais atau *milling*, beserta perlengkapannya atau aksesorisnya *(jig and fixture)*, mesin uji tarik, dan tool pengelasan.

3.4.1 Spesifikasi Alat

1. Mesin Frais (*Milling*)

   Mesin Frais (*Milling*) digunakan untuk mengelas spesimen yang akan dilas, sehingga didapatkan hasil pengelasan yang diinginkan. Mesin frais disini berfungsi untuk memutar tool pengelasan dan mencekam spesimen las pada meja mesin. Gambar mesin frais dapat dilihat dibawah ini.

Gambar 3.1 Mesin Frais (*Milling*)
Sumber: Laboratorium Proses Produksi, Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya

Spesifikasi:

- Merek : Krisbow
- Jenis : Turning
- Model : X6328B
- Buatan : Austria
- Tahun Pembuatan : 2011

2. Mesin Uji tarik

Mesin uji tarik digunakan untuk menarik spesimen hasil lasan sehingga didapatkan data hasil nilai uji tarik sambungan las aduk gesek (*friction stir welding)* pada aluminium.

Gambar 3.2 Mesin Uji Tarik
Sumber: Laboratorium Pengujian Bahan, Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya

Spesifikasi:

- Merek : MLF Piuf.Und Mc By Heme Gmbh D6800
- Kapasitas : 100 kN
- Type : U PD 10
- Buatan : Jerman
- Tahun Pembuatan : 1982

3. *Feeler Gauge*

Gambar 3.3 *Feeler Gauge*
Sumber: www.otomotifkita.blogspot.com

Pada penelitian kali ini *feeler gauge* digunakan untuk memberikan celah antara kedua buah plat yang akan disambung. Dengan menggunakan bantuan *feeler gauge* diharapkan pemberian celah antara kedua buah plat yang akan disambung dapat presisi.

4. Kunci Pas dan Spana

Kunci pas dan spana digunakan untuk memasang dan melepas benda kerja pada saat proses pengelasan.

5. Sarung Tangan

Digunakan untuk melindungi tangan dari panasnya benda kerja, geram dan bagian-bagian benda kerja yang tajam.

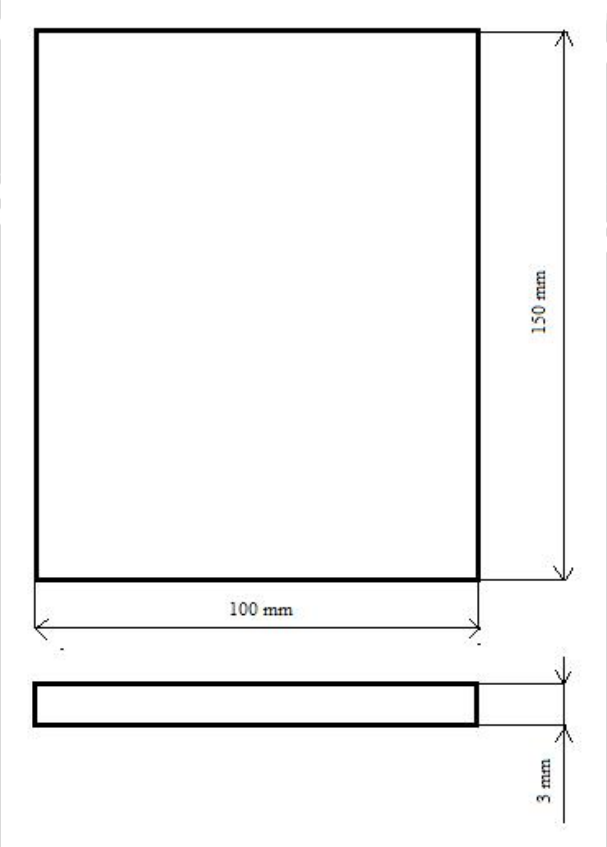
3.4.2 Bahan Penelitian

1. Benda kerja

Pada pengelasan *friction stir welding* kali ini menggunakan 2 buah benda kerja yang akan disambung dengan dimensi masing-masing sebagai berikut:

- Lebar : 100 mm
- Panjang : 150 mm
- Tebal : 3 mm
- Jenis benda kerja : Aluminium

Gambar 3.4 Benda Kerja



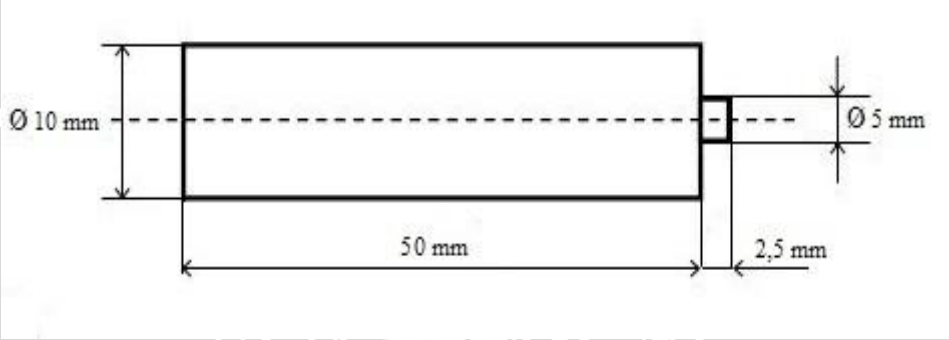
Gambar 3.5 Dimensi Benda Kerja

2. Tool Pengelasan (*Welding Tool*)

Tool pengelasan pada penelitian ini terbuat dari material HSS. Dikarenakan sulitnya mendapatkan tool pengelasan *friction stir welding*, maka untuk penelitian ini, tool pengelasan yang akan digunakan didesain sendiri dengan menggunakan mata bor yang dimodifikasi sedemikian rupa, sehingga membentuk sebuah tool pengelasan yang terdiri dari pin (*probe*) dan *shoulder* yang sederhana. Tool pengelasan yang yang dipakai pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

Gambar 3.6 Tool Pengelasan

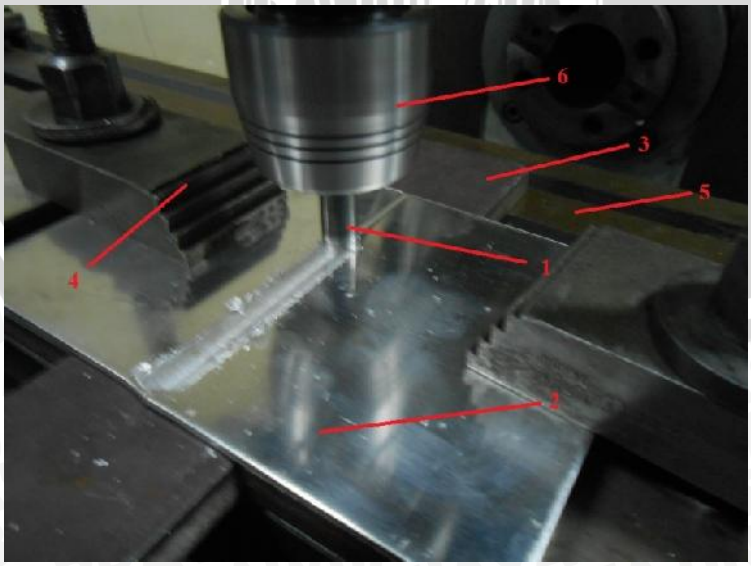
Tool pengelasan pada penelitian ini didesain dan dibentuk dengan menggunakan mesin bubut, sehingga didapatkan ukuran dan dimensi yang sesuai dengan yang diinginkan.



Gambar 3.7 Dimensi Tool Pengelasan

3.5 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian atau pengelasan dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.8 Instalasi Penelitian

Keterangan:

1. Tool Pengelasan (*Welding Tool*)
2. Benda Kerja
3. Landasan Benda Kerja
4. Pencekam Benda Kerja
5. Meja Mesin
6. Pencekam Tool Pengelasan

3.6 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian sebelum melakukan proses pengelasan adalah:

1. Mempersiapkan plat atau benda kerja
2. Memotong plat atau benda kerja sehingga sesuai dengan ukuran yang diinginkan, menggunakan mesin potong.
3. Mempersiapkan tool pengelasan
4. Membentuk atau membubut tool pengelasan sehingga sesuai dengan standar yang diinginkan.

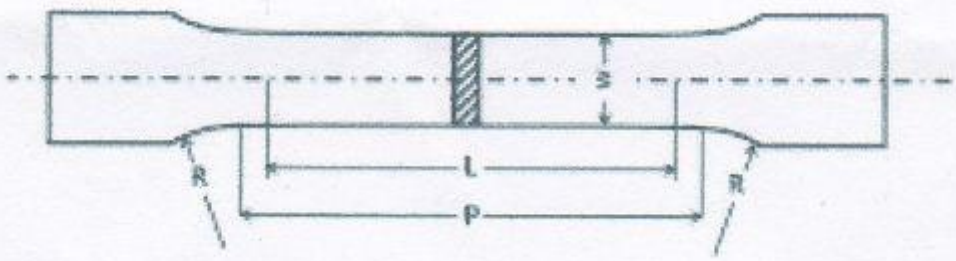
3.6.1 Proses Pengelasan

Langkah-langkah yang digunakan dalam proses pengelasan adalah:

1. Mempersiapkan mesin frais atau *milling*
2. Mempersiapkan benda kerja yang akan dilas pada meja las atau meja kerja pada mesin frais atau *milling.*
3. Mempersiapkan *tool* pengelasan.
4. Posisi pengelasan yang digunakan adalah posisi mendatar.
5. Mengatur kecepatan putar yang digunakan, dan mengetur lebar celah yang diinginkan, kemudian mesin dihidupkan dan proses pengelasan dimulai. Poin 5 dan seterusnya dilakukan berulang kali tergantung banyaknya pengujian yang dilakukan.
6. Mematikan mesin dan melepaskan benda kerja yang sudah selesai di las dari meja kerja pada mesin frais.
7. Memberikan nomer atau tanda agar benda kerja yang telah selesai dikerjakan tidak tertukar.
8. Membersihkan mesin setelah proses pengelasan selesai.

3.6.2 Proses Pengujian Kekuatan Tarik

Sebelum melakukan uji tarik, spesimen atau benda kerja dibentuk terlebih dahulu menjadi spesimen uji tarik yang sesuai dengan standart internasional. Spesimen uji tarik yang digunakan adalah plat aluminium, dengan tebal 3 mm kemudian dibentuk berdasarkan standar JIS no 13B.



Gambar 3.9 Dimensi Benda Kerja Uji Tarik
Sumber: Pengembangan FSW Pada Material AC4CH, Samsi Suardi, 2011: 9

Tabel 3.1 Keterangan Dimensi Benda Kerja Uji Tarik

Lebar (W)	Panjang Ukur (L)	Panjang Bagian. Parallel (P)	Jari-jari Bahu (R)
12,5	50	60	20

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

1. Menyiapkan benda uji dan jepit benda uji pada mesin.
2. Benda uji mulai mendapatkan beban tarik diawali 0 kg hingga benda putus pada beban maksimum yang dapat ditahan benda tersebut.
3. Benda uji yang sudah putus kemudian diukur dimensinya.
4. Hal terakhir yaitu menghitung kekuatan tarik, perpanjangan, reduksi penampang dari data yang telah didapat dengan menggunakan persamaan yang ada.

3.7 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian digunakan untuk mencari pengaruh dari suatu faktor, yaitu pengaruh kecepatan putar dan lebar celah pada pengelasan aduk gesek *(friction stir welding)* terhadap kekuatan tarik hasil lasan pada alumulium.

3.7.1 Analisa Data

Pengujian ini meliputi uji tarik pada material plat aluminium yang mengalami proses pengelasan aduk gesek *(friction stir welding)* dengan variasi kecepatan putar dan lebar celah. Data yang didapat akan dicatat dan diolah kemudian dimasukkan kedalam Tabel Data Hasil Kekuatan Uji Tarik dibawah ini.

Tabel 3.2 Rancangan Data Pengujian Tarik

Tabel Data Hasil Kekuatan Uji Tarik					
NO	Lebar celah (mm)	Kecepatan Putar (rpm)	Pengulangan	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekuatan Tarik Rata-rata (MPa)
1	0	1452	a	X_{111}	
			b	X_{112}	
			c	X_{113}	
		1842	a	X_{121}	
			b	X_{122}	
			c	X_{123}	
		2257	a	X_{131}	
			b	X_{132}	
			c	X_{133}	
2	0,5	1452	a	X_{211}	
			b	X_{212}	
			c	X_{213}	
		1842	a	X_{221}	
			b	X_{222}	
			c	X_{223}	
		2257	a	X_{231}	
			b	X_{232}	
			c	X_{233}	
3	1	1452	a	X_{311}	
			b	X_{312}	
			c	X_{313}	
		1842	a	X_{321}	
			b	X_{322}	
			c	X_{323}	
		2257	a	X_{331}	
			b	X_{331}	
			c	X_{333}	

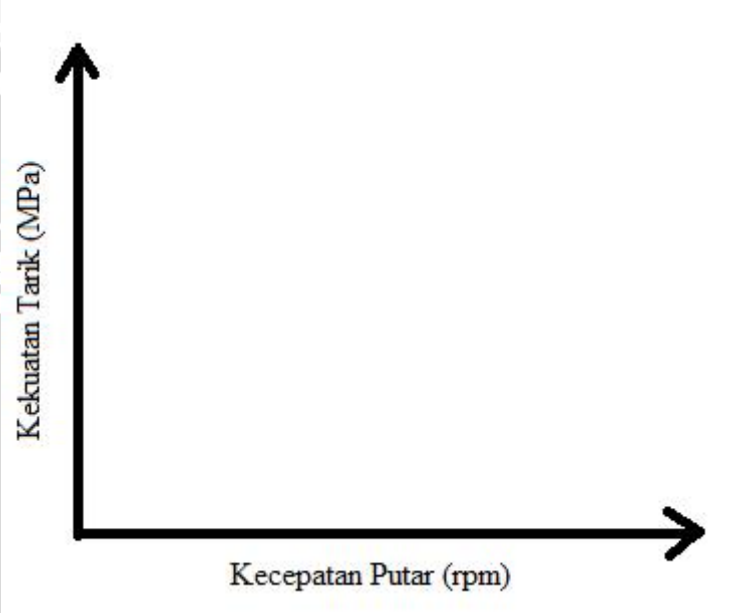
3.7.2 Analisa Statistik

Analisa Statistik yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah analisa varian (anova). Analisa ini bertujuan untuk apakah variabel bebas berpengaruh terhadap

variabel terikat. Analisa varian yang digunakan dalam metode kali ini adalah analisa varian dua arah. Dari analisa varian dua arah ini akan diketahui ada tidaknya pengaruh suatu variabel bebas terhadap variabel terikat.

3.7.3 Analisa Grafik

Analisa grafik dilakukan dengan menggunakan bantuan software microsoft exel. Analisa grafik dilakukan dengan pengamatan perubahan *trend* data pada grafik yang diperoleh dari ploting data.

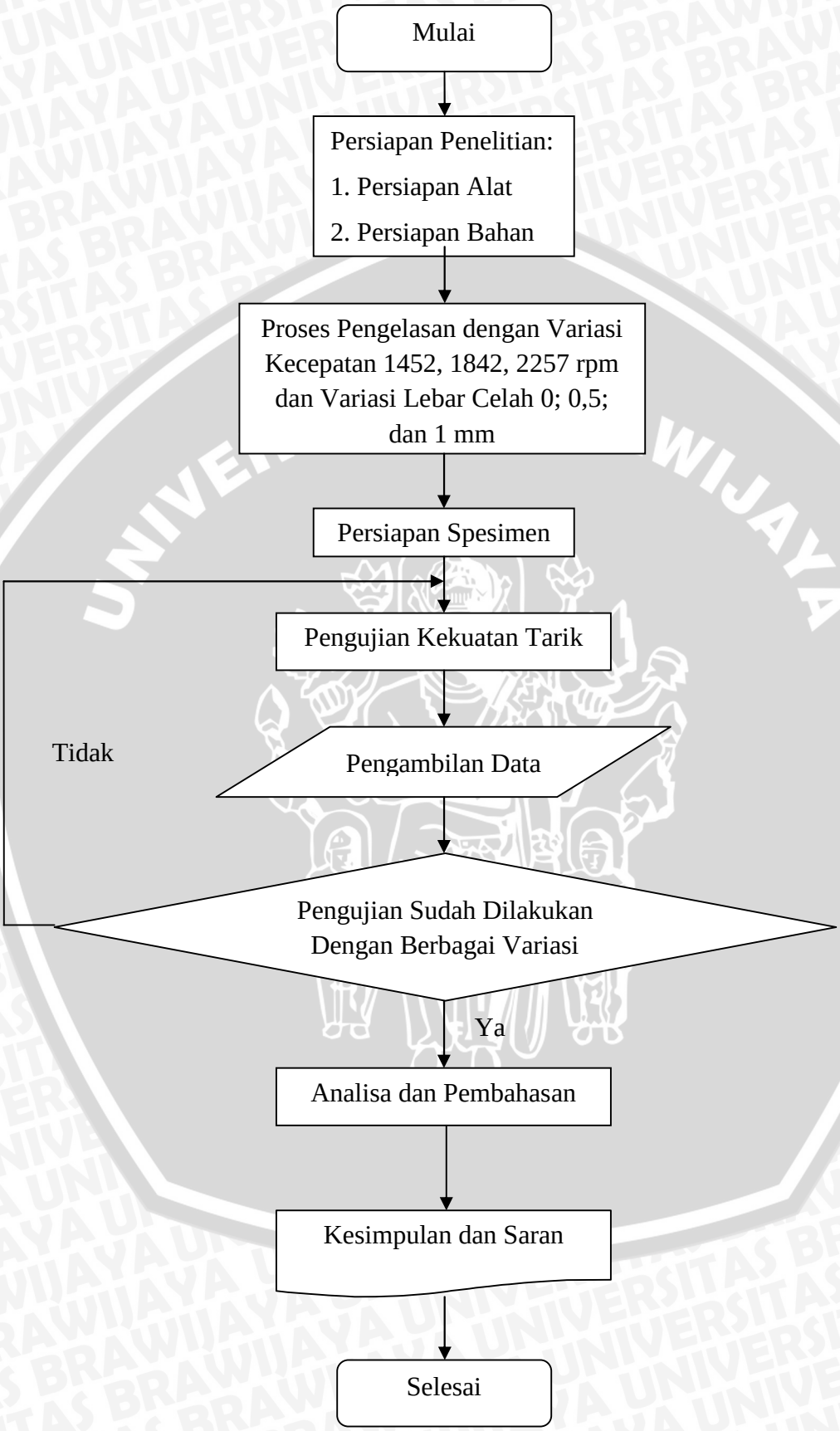


Gambar 3.10 Rancangan Grafik Hubungan Antara Kecepatan Putar dan Lebar Celah Terhadap Kekuatan Tarik

3.7.4 Analisa Struktur Mikro

Analisa struktur mikro kali ini bertujuan untuk mengetahui struktur mikro dari material induk sebelum dan sesudah dilakukan pengelasan. Dari analisa struktur mikro juga dapat teelihat perbedaan yang terjadi pada logam induk akibat pengelasan, dan perbedaan ukuran butir antara zona pengelasan dan material induk.

3.8 Diagram Alir



Gambar 3.11 Diagram Alir Penelitian

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Uji Tarik Sambungan Las

Pengambilan data menggunakan alat uji tarik setelah specimen dilakukan pengelasan dan dibentuk sesuai dengan standar uji tarik. Pada setiap perlakuan lebar celah dan kecepatan putar yang berbeda dilakukan satu kali pengelasan dan tiga kali uji tarik yang nantinya diperoleh nilai rata-rata dari ketiga pengujian. Nilai yang diperoleh dari hasil uji tarik dapat dilihat pada tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4.1 Data Hasil Uji Tarik Pada Sambungan Las

Tabel Data Hasil Kekuatan Uji Tarik					
NO	Lebar celah (mm)	Kecepatan Putar (rpm)	Pengulangan	Kekuatan Tarik (MPa)	Kekuatan Tarik Rata-rata (MPa)
1	0	1452	a	114,67	112,44
			b	112,00	
			c	110,67	
		1842	a	116,00	117,78
			b	120,00	
			c	117,33	
		2257	a	98,67	100
			b	100,00	
			c	101,33	
2	0,5	1452	a	96,00	95,11
			b	90,67	
			c	98,67	
		1842	a	101,33	103,56
			b	106,67	
			c	102,67	
		2257	a	80,00	78,67
			b	76,00	
			c	80,00	
3	1	1452	a	82,67	79,11
			b	80,00	
			c	74,67	
		1842	a	88,00	88,89
			b	90,67	
			c	88,00	
		2257	a	69,33	71,56
			b	73,33	
			c	72,00	

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

4.2 Perhitungan Statistik

4.2.1 Interval Penduga

Pada penelitian ini, langkah awal dalam pengolahan data adalah melakukan metode uji t terlebih dahulu, dengan tujuan untuk mengetahui adanya kesalahan nilai atau data yang didapat pada saat pengujian kekuatan tarik.

Tabel 4.2 Interval Penduga Kekuatan Tarik (MPa)

Kecepatan Putar (rpm)	Lebar Celah (mm)								
	0			0,5			1		
1452	100,77	≤ x ≤	124,12	78,73	≤ x ≤	111,49	62,73	≤ x ≤	95,49
1842	106,11	≤ x ≤	129,45	87,65	≤ x ≤	119,46	80,08	≤ x ≤	97,71
2257	92,36	≤ x ≤	107,64	65,43	≤ x ≤	91,90	59,89	≤ x ≤	83,23

Berdasarkan hasil dari uji t pada tabel 4.2 diketahui bahwa seluruh data yang diperoleh dari pengujian kekuatan tarik rata-rata, terletak dalam *range* interval penduga dengan tingkat keyakinan 99%.

4.2.2 Anova

Setelah data dari hasil uji tarik didapat kemudian akan dilakukan pengujian statistik untuk mengetahui ada atau tidaknya pengaruh antara variasi lebar celah dan kecepatan putar terhadap kekuatan tarik sambungan las aluminium. Sebelumnya akan dibuat hipotesa terlebih dahulu dan data hasil dari pengujian tarik akan dimasukkan kedalam tabel yang dapat dilihat pada tabel 4.3

Hipotesa:

Ho : Tidak ada pengaruh antara lebar celah dan kecepatan putar terhadap kekuatan uji tarik sambungan las *friction stir welding*

H1 : Ada pengaruh antara lebar celah dan kecepatan putar terhadap kekuatan uji tarik sambungan las *friction stir welding*

Data statistika induk dapat kita lihat pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Data statistika induk perhitungan Anova Kekuatan Uji Tarik (MPa)

Variabel		Pengulangan	Lebar Celah (mm)			Total Baris
			0	0,5	1	
Kecepatan Putar (rpm)	1452	1	114,67	96,00	82,67	
		2	112,00	90,67	80,00	
		3	110,67	98,67	74,67	
	Jumlah		337,33	285,33	237,33	860,00
	1842	1	116,00	101,33	88,00	
		2	120,00	106,67	90,67	
		3	117,33	102,67	88,00	
	Jumlah		353,33	310,67	266,67	930,67
	2257	1	98,67	77,33	69,33	
		2	100,00	76,00	73,33	
		3	101,33	80,00	72,00	
	Jumlah		300,00	233,33	214,67	748,00
Jumlah Total			990,67	829,33	718,67	2538,67

$$JKT = 244967{,}1111 - \frac{6444828{,}444}{27} = 6269{,}761$$

$$JKB = \left(\frac{2165244{,}444}{9}\right) - \frac{6444828{,}444}{27} = 1885{,}366$$

$$JKK = \left(\frac{2185696}{9}\right) - \frac{6444828{,}444}{27} = 4157{,}761$$

$$JK(BK) = \left(\frac{734531{,}5556}{3}\right) - \frac{6444828{,}444}{27} - 1885{,}366 - 4157{,}761 = 103{,}3745$$

$$JKG = 6269{,}761 - 1885{,}366 - 4157{,}761 - 103{,}3745 = 123{,}2592593$$

$dbr_{(BARIS)}$ = 3 – 1 = 2

$dbc_{(KOLOM)}$ = 3 – 1 = 2

$dbrc_{(INTERAKSI)}$ = 2 . 2 = 4

$dbd_{(RESIDU)}$ = 27 – (3.3) = 27 – 9 = 18

$dbt_{(TOTAL)}$ = 27 – 1 = 26

$$S_1^2 = \frac{1885{,}366}{2} = 942{,}6831$$

$$S_2^2 = \frac{4157{,}761}{2} = 2078{,}881$$

$$S_3^2 = \frac{103,3745}{4} = 25,84362$$

$$S_4^2 = \frac{123,2592593}{18} = 6,847737$$

$$F_1 = \frac{942,6831}{6,847737} = 137,6635$$

$$F_2 = \frac{2078,881}{6,847737} = 303,5865$$

$$F_3 = \frac{25,84362}{6,847737} = 3,774038462$$

α : 0,05

$F_{1(tabel)}$ = 3,55

$F_{2(tabel)}$ = 3,55

$F_{3(tabel)}$ = 2,93

Dari perhitungan statistik menggunakan analisa varian dua arah, maka akan didapatkan data seperti yang terlihat pada tabel 4.4 dibawah ini.

Tabel 4.4 Analisa Varian Dua Arah Kekuatan Tarik Rata-rata

Sumber Keragaman	Jumlah Kuadrat	Derajat Bebas	Kuadrat Tengah	f hitung	f tabel
Nilai Tengah Baris	1885,36	2	942,68	137,66	3,55
Nilai Tengah Kolom	4157,76	2	2078,88	303,59	3,55
Interaksi	103,37	4	25,84	3,77	2,93
Galat	123,25	18	6,85		
Total	6269,76	26			

Kesimpulan:

a. $F_{1\ (hitung)} > F_{1\ (tabel)}$ atau 137,66 > 3,55. Karena harga $F_{1\ (hitung)}$ lebih besar dari $F_{1\ (tabel)}$ maka Ho ditolak dan H1 diterima artinya ada pengaruh antara kecepatan putar terhadap kekuatan tarik pengelasan *friction stir welding.*

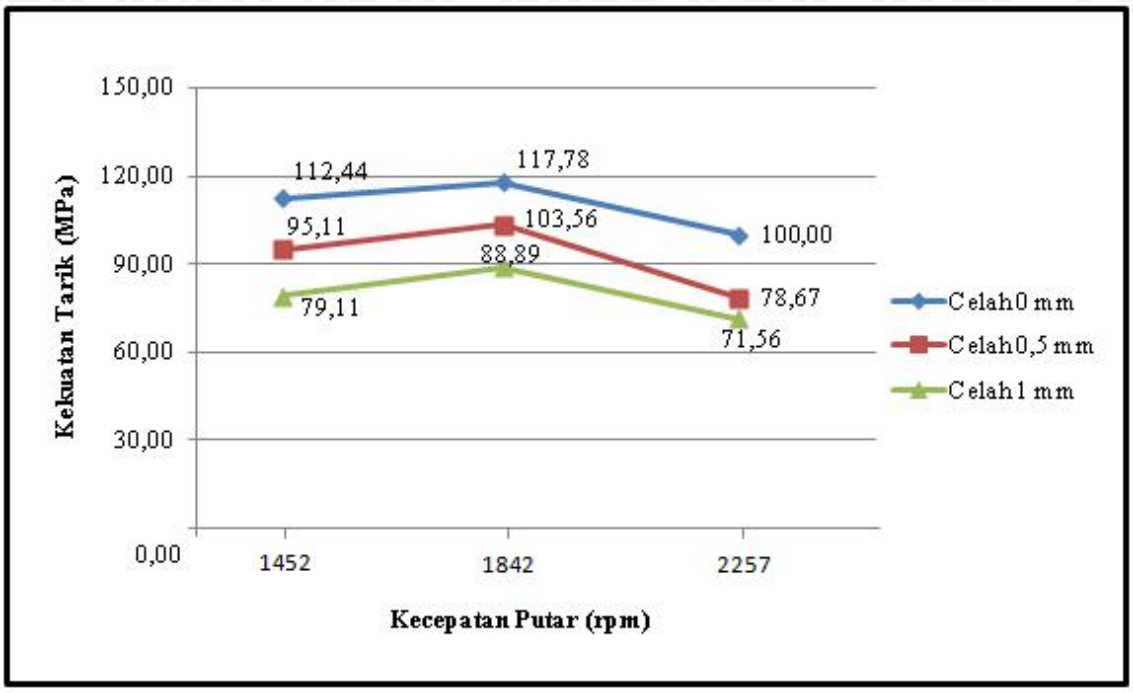
b. $F_{2\ (hitung)} > F_{2\ (tabel)}$ atau 303,59 > 3,55. Karena harga $F_{2\ (hitung)}$ lebih besar dari $F_{2\ (tabel)}$ maka Ho ditolak dan H1 diterima artinya ada pengaruh antara lebar celah terhadap kekuatan tarik pengelasan *friction stir welding.*

c. $F_{3\ (hitung)} > F_{3\ (tabel)}$ atau 3,77 > 2,93. Karena harga $F_{3\ (hitung)}$ lebih besar dari $F_{3\ (tabel)}$ maka Ho ditolak dan H1 diterima artinya ada interaksi pengaruh antara lebar celah dan kecepatan putar terhadap kekuatan tarik pengelasan *friction stir welding.*

4.3 Pembahasan

4.3.1 Hubungan Lebar Celah dan Kecepatan Putar Terhadap Kekuatan Tarik

Grafik hubungan lebar celah dan kecepatan putar terhadap kekuatan tarik dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4.1 Grafik Hubungan Pengaruh Variasi Lebar Celah dan Kecepatan Putar Terhadap Kekutan tarik Sambungan Las Pada Aluminium

Pada grafik hubungan kecepatan putar terhadap hasil uji tarik sambungan las pada aluminium diatas dapat dilihat bahwa, kecendrungan terjadi peningkatan nilai kekuatan tarik pada kecepatan putar 1452 rpm ke kecepatan putar 1842 rpm, kemudian terjadi penurunan pada kecepatan putar 2257 rpm. Besarnya nilai kecepatan putar pada proses pengelasan *friction stir welding* berpengaruh terhadap nilai kekuatan tarik aluminium.

Pada variasi lebar celah 0 mm, kecepatan putar 1452 rpm, nilai kekuatan tarik yang didapat adalah sebesar 112,44 MPa, kemudian terjadi peningkatan kekuatan tarik pada kecepatan putar 1842 rpm, dengan nilai 117,78 MPa, lalu terjadi penurunan nilai kekuatan tarik pada kecepatan putar 2257 rpm dengan nilai 100 MPa. Pada lebar celah 0,5 mm, kecepatan putar 1452 rpm, nilai kekuatan tariknya sebesar 95,11 MPa, kemudian meningkat pada kecepatan putar 1842 rpm sebesar 103,56 MPa, dan menurun pada kecepatan putar 2257 rpm yaitu sebesar 78,67 MPa. Sedangkan pada lebar celah 1 mm nilai kekuatan tarik sambungan las 79,11 MPa untuk kecepatan putar 1452 rpm,

kemudian kekuatan tarik meningkat menjadi 88,89 MPa pada kecepatan putar 1842 MPa, dan turun pada kecepatan putar 2257 rpm menjadi sebesar 71,56 MPa.

Grafik diatas menunjukkan, kecendrungan peningkatan nilai kekuatan tarik yang dialami pada lebar celah 0 mm juga terjadi pada lebar celah 0,5 mm dan lebar celah 1 mm, begitu pula dengan penurunannya. Kecendrungan penurunan nilai kekuatan tarik yang pada variasi lebar celah 0 mm, juga terjadi pada lebar celah 0,5 mm dan lebar celah 1 mm.

Dapat dilihat bahwa pada saat lebar celah konstan dengan kecepatan putar yang terus naik maka, terjadi peningkatan kekuatan tarik pada kecepatan 1452 rpm ke kecepatan putar 1842 rpm, kemudian jika kecepatan putar ditambah menjadi 2257 rpm maka, nilai kekuatan tarik mengalami penurunan. Hal tersebut terjadi karena pada saat nilai kecepatan putar 1452 rpm, gesekan yang terjadi antara *shoulder* dan benda kerja terlalu kecil sehingga panas yang dihasilkan tidak cukup untuk melunakan logam induk yang akan dilas, sehingga hasil pengelasan tidak sempurna. Pada kecepatan 1842 rpm sambungan mengalami peningkatan, hal ini karena panas yang dihasilkan akibat gesekan antara shoulder dan benda kerja cukup untuk melunakkan logam induk sehingga kekuatan tariknya meningkat. Pada kecepatan 2257 rpm nilai kekuatan tarik mengalami penurunan, hal ini disebabkan karena semakin tinggi nilai kecepatan putar yang ditambah maka gesekan yang terjadi antara permukaan *shoulder* dan benda kerja akan semakin besar, dan menyebabkan *heat input* yang dihasilkan juga semakin besar sehingga terjadi perubahan fisik atau struktur pada logam induk akibat panas yang berlebihan.

Berdasarkan data diatas dapat dilihat bahwa menambah atau mengurangi kecepatan putar sangat berpengaruh terhadap pemasukan *heat input* pada saat proses pengelasan. Hal tersebut sesuai dengan rumus di bawah ini:

$$Q = \frac{2}{3}®.\mu.²_{contact}(R^3{}_{shoulder} + 3R^2{}_{probe}.H_{probe})$$

Dimana:

Q = Panas Total yang Dihasilkan (J/s)

ω = Kecepatan Putar (rpm)

$R_{shoulder}$ = Jari-jari *Shoulder* (m)

R_{probe} = Jari-jari *Probe* (m)

H_{probe} = Tinggi *Probe* (m)

$\tau_{contact}$ = $\tau_{contact}$ untuk Aluminium = 20 MPa (D. Lohwasser, Z. Chen 2009)

Dari rumus diatas dapat dilihat bahwa variabel kecepatan putar sangat berpengaruh pada *heat input* yang dihasilkan. Menambah nilai kecepatan putar akan menaikkan panas pengelasan dan mengurangi kecepatan putar juga akan menurunkan panas pada saat proses pengelasan, sehingga berpengaruh pada kekuatan tarik yang dihasilkan.

Pada saat kecepatan putar konstan dengan lebar celah yang terus naik maka, terjadi penurunan kekuatan tarik pada lebar celah 0 mm ke lebar celah 0,5 mm kemudian turun lagi pada lebar celah 1 mm. Penurunan kekuatan tarik pada saat kecepatan putar yang kostan dan nilai lebar celah yang terus ditambah terjadi karena, semakin besar nilai variasi lebar celah yang diberikan, maka bidang kontak antara tool pengelasan dan material yang akan disambung semakin sedikit sehingga panas yang ditimbulkan tidak cukup untuk pengelasan.

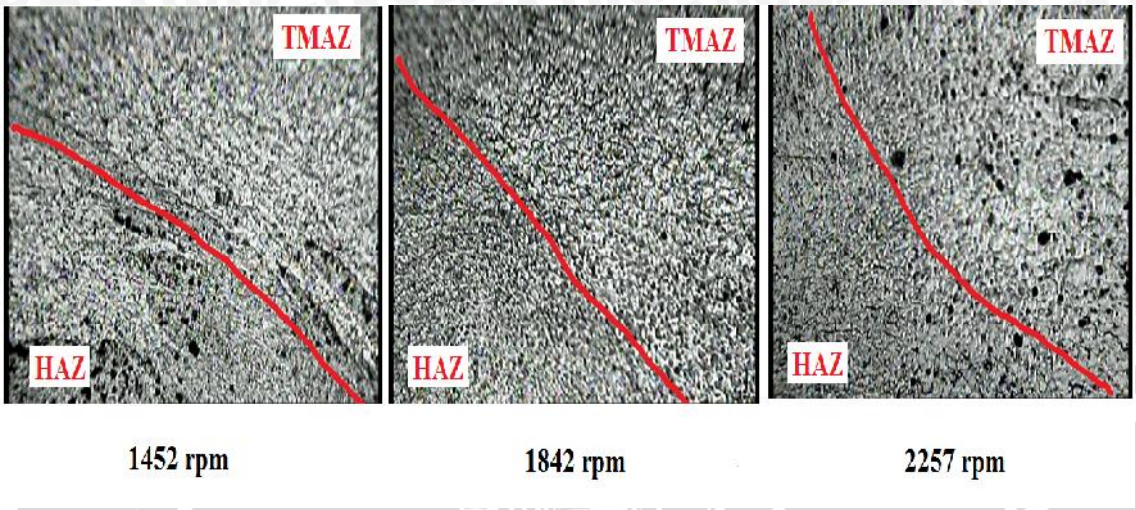
Pada saat lebar celah 0 mm, tidak ada celah atau ruang kosong diantara benda kerja yang akan disambung, sehingga gesekan yang terjadi antara *shoulder* dan benda kerja semakin besar akibat gesekan yang besar. Akibat gesekan yang besar maka panas yang dihasilkan juga semakin besar sehingga panas yang didapat cukup untuk melunakkan material yang akan disambung dan kekuatan tarik meningkat.

Pada lebar celah 0,5 mm, kekuatan tarik mengalami penurunan. Hal ini disebabkan karena terdapat ruang kosong ataupun celah diantara kedua benda kerja yang akan disambung, sehingga gesekan yang terjadi antara *shoulder* dan benda kerja berkurang, dan panas yang dibutuhkan untuk proses pengelasan juga berkurang, sehingga kekuatan tarik menurun.

Sedangkan pada saat lebar celah 1 mm, ruang kosong ataupun celah diantara kedua benda kerja yang akan disambung semakin besar, dan kekuatan tarik mengalami penurunan kembali. Celah yang semakin besar mengakibatkan gesekan antara *shoulder* dan material yang akan disambung semakin kecil, dan *heat input* yang dihasilkan juga semakin berkurang, sehingga panas yang dihasilkan tidak cukup untuk melunakkan logam induk pada saat proses pengelasan, dan kekuatan tarik kembali mengalami penurunan.

4.3.2 Analisa Hasil Struktur Mikro

Dibawah ini merupakan gambar struktur mikro dengan pembesaran 100x dikelompokan berdasarkan variasi lebar celah. Gambar diambil diantara daerah TMAZ dan daerah HAZ untuk mengetahui perbandingan bentuk butiran diantara kedua zona yang berbeda.

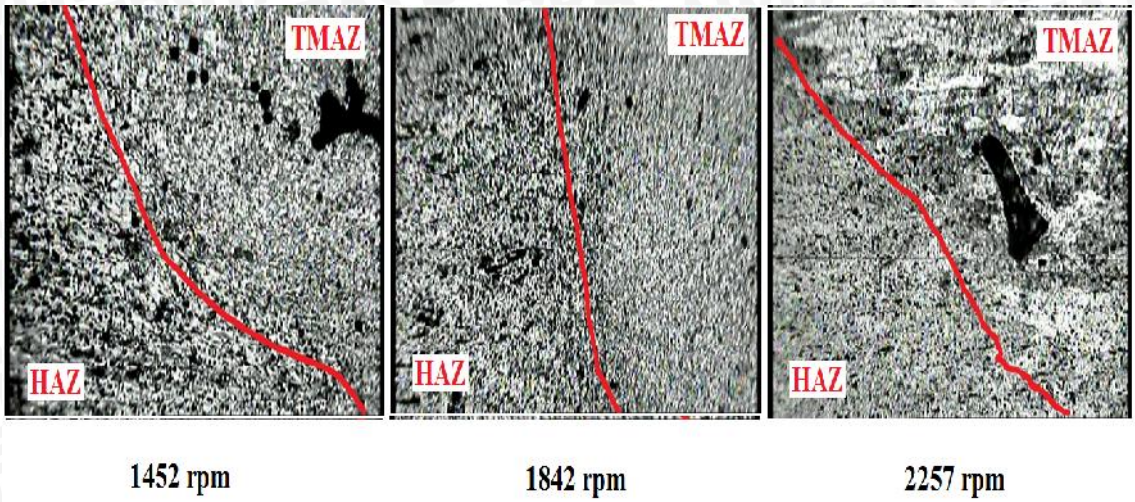


Gambar 4.2 Foto Struktur Mikro Dengan Pembesaran 100x Diantara Daerah TMAZ dan Daerah HAZ Pada Lebar Celah 0 mm Dengan Kecepatan Putar yang Berbeda.

Pada gambar 4.2 terlihat struktur mikro pada kecepatan putar 1452 rpm terdapat adanya cacat las berupa retakan diantara daerah TMAZ dan daerah HAZ. Cacat tersebut diakibatkan proses pengelasan yang kurang sempurna akibat kecepatan putar yang terlalu rendah.

Pada kecepatan putar 1842 rpm ukuran butir terlihat semakin halus dan ukuran butir pada daerah TMAZ hampir menyerupai ukuran butir pada daerah HAZ serta tidak ditemukan adanya cacat pada pengelasan sehingga kekuatan tariknya meningkat. Penambahan kecepatan putar pada saat pengelasan berpengaruh terhadap ukuran butiran yang dihasilkan.

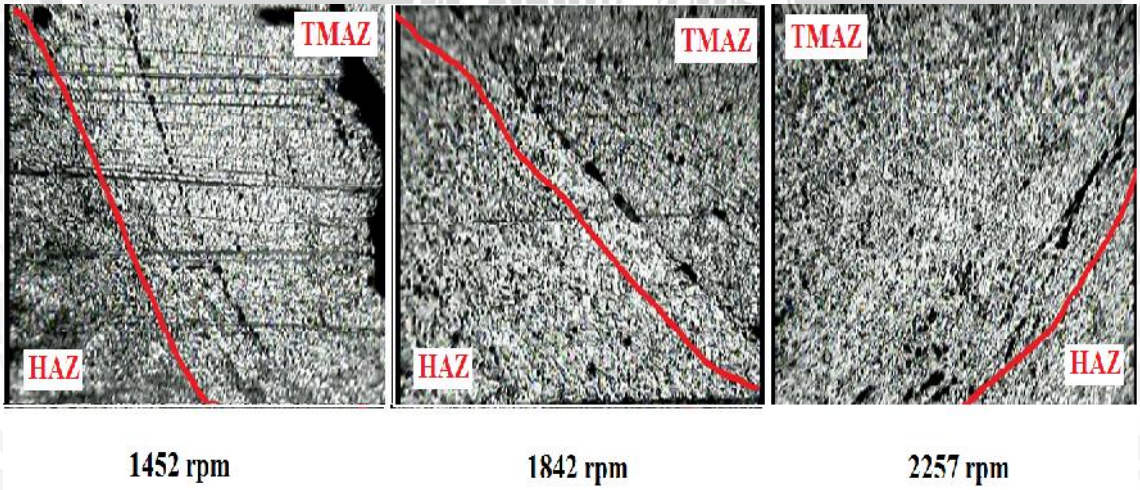
Pada kecepatan putar 2257 rpm terlihat ukuran butiran pada daerah TMAZ cenderung lebih besar jika dibandingkan dengan daerah HAZ. Ukuran butir yang terlalu besar disebabkan karena *heat input* yang berlebihan akibat kecepatan putar yang terlalu tinggi.



Gambar 4.3 Foto Struktur Mikro Dengan Pembesaran 100x Diantara Daerah TMAZ dan Daerah HAZ Pada Lebar Celah 0,5 mm Dengan Kecepatan Putar yang Berbeda.

Pada lebar celah 0,5 mm dan kecepatan putar yang berbeda dapat dilihat bahwa penambahan lebar celah membuat ukuran butir pada zona TMAZ menjadi lebih kecil kecil dibandingkan zona HAZ. Akibat adanya celah pada saat proses pengelasan mengakibatkan bidang kontak antara shoulder dan material yang akan disambung semakin sedikit sehingga panas yang dihasilkan berkurang dan mempengaruhi ukuran butir.

Sedangkan pada kecepatan putar 2257 rpm bentuk butiran pada daerah TMAZ masih lebih besar jika dibandingkan daerah HAZ. Hal tersebut disebabkan karena panas yang dihasilkan akibat gesekan antara *tool welding* dan logam induk pada saat proses pengelasan masih terlalu tinggi.



Gambar 4.4 Foto Struktur Mikro Dengan Pembesaran 100x Diantara Daerah TMAZ dan Daerah HAZ Pada Lebar Celah 1 mm Dengan Kecepatan Putar yang Berbeda.

Gambar 4.4 menunjukan struktur mikro diantara daerah TMAZ dan daerah HAZ pada lebar celah 1 mm. Dari ketiga variasi putaran dapat dilihat bahwa terdapat cacat berupa retakan diantara kedua daerah tersebut, cacat disebabkan karena celah yang terlalu lebar, sehingga menyebabkan proses pengadukan pada saat proses penyambungan material kurang sempurna.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Variasi lebar celah dan kecepatan putar, berpengaruh terhadap kekuatan uji tarik sambungan las aduk gesek (*friction stir welding*) pada aluminium.
2. Semakin tinggi kecepatan putar yang diberikan maka *heat input* yang dihasilkan akan semakin besar, dan kekuatan tarik yang dihasilkan juga akan meningkat. Namun kecepatan putar yang terlalu tinggi membuat *heat input* yang dihasilkan semakin besar sehingga terjadi perubahan fisik atau struktur pada meterial induk yang akan disambungdan mengakibatkan kekuatan tarik menurun.
3. Semakin besar lebar celah yang diberikan maka gesekan antara *tool welding* dan material akan semakin kecil akibat bidang kontak yang bergesekan semakin sedikit sehingga panas yang dihasilkan akan semakin sedikit dan mengakibatkan kekuatan tarik sambungan las menurun.
4. Kekuatan tarik tertinggi ditunjukkan pada variasi lebar celah 0 mm, dengan kecepatan putar 1842 rpm, yaitu sebesar 117,78 MPa, sedangkan kekuatan tarik terendah ditunjukkan pada variasi lebar celah 1 mm, dengan kecepatan putar 2257 rpm, yaitu sebesar 71,56 MPa

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh variasi lebar celah dan diameter pin terhadap kekuatan tarik pada *friction stir welding*.
2. Pada proses pengelasan, saat pemasangan benda kerja, posisikan sedemikian mungkin agar benda kerja yang akan disambung berada tepat dan sejajar dengan gerak sumbu mesin, sehingga pengelasan tepat ditengah benda kerja yang akan disambung.
3. Pembuatan *fixture* atau alat bantu *friction stir welding* juga dibutuhkan untuk mendukung proses pengelasan.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR PUSTAKA

Luckytoardi Megantoro. 2011. Pengaruh Pengelasan Alumunium 5083 Terhadap Sifat Mekanis dan Biaya Pengelasan dengan Perbedaan Diameter *Shoulder* pada *Friction Stir Welding* (FSW). Institut Teknologi Sepuluh November (ITS), Surabaya, Indonesia.

Shopiyyuddin. 2008. Pengaruh Pembentukan Sambungan Las Komposit Al-Si / Partikel Alumina pada Paduan Hipoeutektik Al-Si pada Proses Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW). Universitas Gunadarma, Jakarta, Indonesia.

Dinar Kusuma Wardhani. 2011. Pengaruh Diameter *Shoulder* Terhadap Metalurgi Alumunium 5083 pada Proses *Friction Stir Welding* (FSW). Institut Teknologi Sepuluh November (ITS), Surabaya, Indonesia.

Khaled, Terry. 2005. An Outsider Looks At Friction Stir Welding, ANM-112N-05-06

Samsi Suardi. 2011. Pengembangan FSW Pada Material AC4CH. Universitas Indonesia, Depok, Indonesia.

Mishra, R dan Murray, M. 2007. Friction Stir Welding And Processing. ASM international, Ohio. United States of America.

C. J. Dawes and W. M. Thomas. 1999. First International Symposium on Friction Stir Welding (Session 7), Thousand Oaks, California, USA

Surdia, T. dan Saito, S. 1995. Pengetahuan Bahan Teknik, Jakarta, Indonesia.

D. Lohwasser, Z. Chen. 2009. Friction Stir Welding, Woodhead Publishing Ltd Cambridge

Tahapan Terjadinya Perpatahan Ulet Pada Sampel Uji Tarik, www.msm.cam.ac.uk (diakses Oktober 2013)

Ronald E Wapole. 1992. Pengantar Statistika Edisi 3, Jakarta, Indonesia.

repository.ub.ac.id

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Lampiran 1

Tabel uji T

dk	α Untuk Uji Dua Pihak					
	0,50	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
	α Untuk Uji Satu Pihak					
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005
1	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	0,695	1,356	1,782	2,178	2,681	3,055
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	0,691	1,341	1,753	2,132	2,623	2,947
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704
60	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660
120	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617
	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
repository.ub.ac.id

Lampiran 2

HARGA DISTRIBUSI F

Baris atas untuk 5%
Baris bawah untuk 1%

v_2 = dk penyebut	v_1 = dk pembilang																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	00
1	161 4.052	200 4.999	216 5.403	225 5.625	230 5.764	234 5.859	237 5.928	239 5.981	241 6.022	242 6.056	243 6.082	244 6.106	245 6.142	246 6.169	248 6.208	249 6.234	250 6.258	251 6.286	252 6.302	253 6.223	253 6.334	254 6.352	254 6.361	254 6.366
2	18,51 98,49	19,00 99,01	19,16 99,17	19,25 99,25	19,30 99,30	19,33 99,33	19,36 99,34	19,37 99,36	19,38 99,38	19,39 99,40	19,40 99,41	19,41 99,42	19,42 99,43	19,43 99,44	19,44 99,45	19,45 99,46	19,46 99,47	19,47 99,48	19,47 99,48	19,48 99,49	19,49 99,49	19,49 99,49	19,50 99,50	19,50 99,50
3	10,13 34,12	9,55 30,81	9,28 29,46	9,12 28,71	9,01 28,24	8,94 27,91	8,88 27,67	8,84 27,49	8,81 27,34	8,78 27,23	8,76 27,13	8,74 27,05	8,71 26,92	8,69 26,83	8,66 26,69	8,64 26,60	8,62 26,50	8,60 26,41	8,58 26,30	8,57 26,27	8,56 26,23	8,54 26,18	8,54 26,14	8,53 26,12
4	7,71 21,20	6,94 18,00	6,59 16,69	6,39 15,98	6,26 15,52	6,16 15,21	6,09 14,98	6,04 14,80	6,00 14,66	5,96 14,54	5,93 14,45	5,91 14,37	5,87 14,24	5,84 14,15	5,80 14,02	5,77 13,93	5,74 13,83	5,71 13,74	5,70 13,69	5,68 13,61	5,66 13,57	5,65 13,52	5,64 13,48	5,63 13,46
5	6,61 16,26	5,79 13,27	5,41 12,06	5,19 11,39	5,05 10,97	4,95 10,67	4,88 10,45	4,82 10,27	4,78 10,15	4,74 10,05	4,70 9,96	4,68 9,89	4,64 9,77	4,60 9,68	4,56 9,55	4,53 9,47	4,50 9,38	4,46 9,29	4,44 9,24	4,42 9,17	4,40 9,13	4,38 9,07	4,37 9,04	4,36 9,02
6	5,99 13,74	5,14 10,92	4,76 9,78	4,53 9,15	4,39 8,75	4,28 8,47	4,21 8,26	4,15 8,10	4,10 7,98	4,06 7,87	4,03 7,79	4,00 7,72	3,96 7,60	3,92 7,52	3,87 7,39	3,84 7,31	3,81 7,23	3,77 7,14	3,75 7,09	3,72 7,02	3,71 6,99	3,69 6,94	3,68 6,90	3,67 6,88
7	5,59 12,25	4,74 9,55	4,35 8,45	4,12 7,85	3,97 7,46	3,87 7,19	3,79 7,00	3,73 6,84	3,68 6,71	3,63 6,62	3,60 6,54	3,57 6,47	3,52 6,35	3,49 6,27	3,44 6,15	3,41 6,07	3,38 5,98	3,34 5,90	3,32 5,85	3,29 5,78	3,28 5,75	3,25 5,70	3,24 5,67	3,23 5,65
8	5,32 11,26	4,46 8,65	4,07 7,59	3,84 7,01	3,69 6,63	3,58 6,37	3,50 6,19	3,44 6,03	3,39 5,91	3,34 5,82	3,31 5,74	3,28 5,67	3,23 5,56	3,20 5,48	3,15 5,36	3,12 5,28	3,08 5,20	3,05 5,11	3,03 5,06	3,00 5,00	2,98 4,96	2,96 4,91	2,94 4,88	2,93 4,86
9	5,12 10,56	4,26 8,02	3,86 6,99	3,63 6,42	3,48 6,06	3,37 5,80	3,29 5,62	3,23 5,47	3,18 5,35	3,13 5,26	3,10 5,18	3,07 5,11	3,02 5,00	2,98 4,92	2,93 4,80	2,90 4,73	2,86 4,64	2,82 4,56	2,80 4,51	2,77 4,45	2,76 4,41	2,73 4,36	2,72 4,33	2,71 4,31
10	4,96 10,04	4,10 7,56	3,71 6,55	3,48 5,99	3,33 5,64	3,22 5,39	3,14 5,21	3,07 5,06	3,02 4,95	2,97 4,85	2,94 4,78	2,91 4,71	2,86 4,60	2,82 4,52	2,77 4,41	2,74 4,33	2,70 4,25	2,67 4,17	2,64 4,12	2,61 4,05	2,59 4,01	2,56 3,96	2,55 3,93	2,54 3,91
11	4,84 9,65	3,98 7,20	3,59 6,22	3,36 5,67	3,20 5,32	3,09 5,07	3,01 4,88	2,95 4,74	2,90 4,63	2,86 4,54	2,82 4,46	2,79 4,40	2,74 4,29	2,70 4,21	2,65 4,10	2,61 4,02	2,57 3,94	2,53 3,86	2,50 3,80	2,47 3,74	2,45 3,70	2,42 3,66	2,41 3,62	2,40 3,60
12	4,75 9,33	3,88 6,93	3,49 5,95	3,26 5,41	3,11 5,06	3,00 4,82	2,92 4,65	2,85 4,50	2,80 4,39	2,76 4,30	2,72 4,22	2,69 4,16	2,64 4,05	2,60 3,98	2,54 3,86	2,50 3,78	2,46 3,70	2,42 3,61	2,40 3,56	2,36 3,49	2,35 3,46	2,32 3,41	2,31 3,38	2,30 3,36
13	4,67 9,07	3,80 6,70	3,41 5,74	3,18 5,20	3,02 4,86	2,92 4,62	2,84 4,44	2,77 4,30	2,72 4,19	2,67 4,10	2,63 4,02	2,60 3,96	2,55 3,85	2,51 3,78	2,46 3,67	2,42 3,59	2,38 3,51	2,34 3,42	2,32 3,37	2,28 3,30	2,26 3,27	2,24 3,21	2,22 3,18	2,21 3,16
14	4,60 8,86	3,74 6,51	3,34 5,56	3,11 5,03	2,96 4,69	2,85 4,46	2,77 4,28	2,70 4,14	2,65 4,03	2,60 3,94	2,56 3,86	2,53 3,80	2,48 3,70	2,44 3,62	2,39 3,51	2,35 3,43	2,31 3,34	2,27 3,26	2,24 3,21	2,21 3,14	2,19 3,11	2,16 3,06	2,14 3,02	2,13 3,00

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
repository.ub.ac.id

v_2 = dk penyebut	v_1 = dk pembilang																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	00
15	4,54 8,68	3,68 6,36	3,29 5,42	3,06 4,89	2,90 4,56	2,79 4,32	2,70 4,14	2,64 4,00	2,59 3,89	2,55 3,80	2,51 3,73	2,48 3,67	2,43 3,56	2,39 3,48	2,33 3,36	2,29 3,29	2,25 3,20	2,21 3,12	2,18 3,07	2,15 3,00	2,12 2,97	2,10 2,92	2,08 2,89	2,07 2,87
16	4,49 8,53	3,63 6,23	3,24 5,29	3,01 4,77	2,85 4,44	2,74 4,20	2,66 4,03	2,59 3,89	2,54 3,78	2,49 3,69	2,45 3,61	2,42 3,55	2,37 3,45	2,33 3,37	2,28 3,25	2,24 3,18	2,20 3,10	2,16 3,01	2,13 2,96	2,09 2,89	2,07 2,86	2,04 2,80	2,02 2,77	2,01 2,75
17	4,45 8,40	3,59 6,11	3,20 5,18	2,96 4,67	2,81 4,34	2,70 4,10	2,62 3,93	2,55 3,79	2,50 3,68	2,45 3,59	2,41 3,52	2,38 3,45	2,33 3,35	2,29 3,27	2,23 3,16	2,19 3,08	2,15 3,00	2,11 2,92	2,08 2,86	2,04 2,79	2,02 2,76	1,99 2,70	1,97 2,67	1,96 2,65
18	4,41 8,28	3,55 6,01	3,16 5,09	2,93 4,58	2,77 4,25	2,66 4,01	2,58 3,85	2,51 3,71	2,46 3,60	2,41 3,51	2,37 3,44	2,34 3,37	2,29 3,27	2,25 3,19	2,19 3,07	2,15 3,00	2,11 2,91	2,07 2,83	2,04 2,76	2,00 2,71	1,98 2,68	1,95 2,62	1,93 2,59	1,92 2,57
19	4,38 8,18	3,52 5,93	3,13 5,01	2,90 4,50	2,74 4,17	2,63 3,94	2,55 3,77	2,48 3,63	2,43 3,52	2,38 3,43	2,34 3,36	2,31 3,30	2,26 3,19	2,21 3,12	2,15 3,00	2,11 2,92	2,07 2,84	2,02 2,76	2,00 2,70	1,96 2,63	1,94 2,60	1,91 2,54	1,90 2,51	1,88 2,49
20	4,35 8,10	3,49 5,85	3,10 4,94	2,87 4,43	2,71 4,10	2,60 3,87	2,52 3,71	2,45 3,56	2,40 3,45	2,35 3,37	2,31 3,30	2,28 3,23	2,23 3,13	2,18 3,05	2,12 2,94	2,08 2,86	2,04 2,77	1,99 2,69	1,96 2,63	1,92 2,56	1,90 2,53	1,87 2,47	1,85 2,44	1,84 2,42
21	4,32 8,02	3,47 5,78	3,07 4,87	2,84 4,37	2,68 4,04	2,57 3,81	2,49 3,65	2,42 3,51	2,37 3,40	2,32 3,31	2,28 3,24	2,25 3,17	2,20 3,07	2,15 2,99	2,09 2,88	2,05 2,80	2,00 2,72	1,96 2,63	1,93 2,58	1,89 2,51	1,87 2,47	1,84 2,42	1,82 2,38	1,81 2,36
22	4,30 7,94	3,44 5,72	3,05 4,82	2,82 4,31	2,66 3,99	2,55 3,76	2,47 3,59	2,40 3,45	2,35 3,35	2,30 3,26	2,26 3,18	2,23 3,12	2,18 3,02	2,13 2,94	2,07 2,83	2,03 2,75	1,98 2,67	1,93 2,58	1,91 2,53	1,87 2,46	1,84 2 42	1,81 2,37	1,80 2,33	1,78 2,31
23	4,28 7,88	3,42 5,66	3,03 4,76	2,80 4,26	2,64 3,94	2,53 3,71	2,45 3,54	2,38 3,41	2,32 3,30	2,28 3,21	2,24 3,14	2,20 3,07	2,14 2,97	2,10 2,89	2,04 2,78	2,00 2,70	1,96 2,62	1,91 2,53	1,88 2,48	1,84 2,41	1,82 2,37	1,79 2,32	1,77 2,28	1,76 2,26
24	4,26 7,82	3,40 5,61	3,01 4,72	2,78 4,22	2,62 3,90	2,51 3,67	2,43 3,50	2,36 3,36	2,30 3,25	2,26 3,17	2,22 3,09	2,18 3,03	2,13 2,93	2,09 2,85	2,02 2,74	1,98 2,66	1,94 2,58	1,89 2,49	1,86 2,44	1,82 2,36	1,80 2,33	1,76 2,27	1,74 2,23	1,73 2,21
25	4,24 7,77	3,38 5,57	2,99 4,68	2,76 4,18	2,60 3,86	2,49 3,63	2,41 3,46	2,34 3,32	2,28 3,21	2,24 3,13	2,20 3,05	2,16 2,99	2,11 2,89	2,06 2,81	2,00 2,70	1,96 2,62	1,92 2,54	1,87 2,45	1,84 2,40	1,80 2,32	1,77 2,29	1,74 2,23	1,72 2,19	1,71 2,17
26	4,22 7,72	3,37 5,53	2,89 4,64	2,74 4,14	2,59 3,82	2,47 3,59	2,39 3,42	2,32 3,29	2,27 3,17	2,22 3,09	2,18 3,02	2,15 2,96	2,10 2,86	2,05 2,77	1,99 2,66	1,95 2,58	1,90 2,50	1,85 2,41	1,82 2,36	1,78 2,28	1,76 2,25	1,72 2,19	1,70 2,15	1,69 2,13
27	4,21 7,68	3,35 5,49	2,96 4,60	2,73 4,11	2,57 3,79	2,46 3,56	2,37 3,39	2,30 3,26	2,25 3,14	2,20 3,06	2,16 2,98	2,13 2,93	2,08 2,83	2,03 2,74	1,97 2,63	1,93 2,55	1,88 2,47	1,84 2,38	1,80 2,33	1,76 2,25	1,74 2,21	1,71 2,16	1,68 2,12	1,67 2,10
28	4,20 7,64	3,34 5,45	2,95 4,57	2,71 4,07	2,56 3,76	2,44 3,53	2,36 3,36	2,29 3,23	2,24 3,11	2,19 3,03	2,15 2,95	2,12 2,90	2,06 2,80	2,02 2,71	1,96 2,60	1,91 2,52	1,87 2,44	1,81 2,35	1,78 2,30	1,75 2,22	1,72 2,18	1,69 2,13	1,67 2,09	1,65 2,06
29	4,18 7,60	3,33 5,52	2,93 4,54	2,70 4,04	2,54 3,73	2,43 3,50	2,35 3,33	2,28 3,20	2,22 3,08	2,18 3,00	2,14 2,92	2,10 2,87	2,05 2,77	2,00 2,68	1,94 2,57	1,90 2,49	1,85 2,41	1,80 2,32	1,77 2,27	1,73 2,19	1,71 2,15	1,68 2,10	1,65 2,06	1,64 2,03
30	4,17 7,56	3,32 5,39	2,92 4,51	2,69 4,02	2,53 3,70	2,42 3,47	2,34 3,30	2,27 3,17	2,21 3,06	2,16 2,98	2,12 2,90	2,09 2,84	2,04 2,74	1,99 2,66	1,93 2,55	1,89 2,47	1,84 2,38	1,79 2,29	1,76 2,24	1,72 2,16	1,69 2,13	1,66 2,07	1,64 2,03	1,62 2,01
32	4,15 7,50	3,30 5,34	2,90 4,46	2,67 3,97	2,51 3,66	2,40 3,42	2,32 3,25	2,25 3,12	2,19 3,01	2,14 2,94	2,10 2,86	2,07 2,80	2,02 2,70	1,97 2,62	1,91 2,51	1,86 2,42	1,82 2,34	1,76 2,25	1,74 2,20	1,69 2,12	1,67 2,08	1,64 2,02	1,61 1,98	1,59 1,96
34	4,13 7,44	3,28 5,29	2,88 4,42	2,65 3,93	2,49 3,61	2,38 3,38	2,30 3,21	2,23 3,08	2,17 2,97	2,12 2,89	2,08 2,82	2,05 2,76	2,00 2,66	1,95 2,58	1,89 2,47	1,84 2,38	1,80 2,30	1,74 2,21	1,71 2,15	1,67 2,08	1,64 2,04	1,61 1,98	1,59 1,94	1,57 1,91

UNIVERSITAS BRAWIJAYA repository.ub.ac.id

v_2 – dk penyebut	v_1 – dk pembilang																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	40	50	75	100	200	500	00
36	4,11	3,26	2,80	2,63	2,48	2,36	2,28	2,21	2,15	2,10	2,06	2,03	1,89	1,93	1,87	1,82	1,78	1,72	1,69	1,65	1,62	1,59	1,56	1,55
	7,39	5,25	4,38	3,89	3,58	3,35	3,18	3,04	2,94	2,86	2,78	2,72	2,62	2,54	2,43	2,35	2,26	2,17	2,12	2,04	2,00	1,94	1,90	1,87
38	4,10	3,25	2,85	2,62	2,46	2,35	2,26	2,19	2,14	2,09	2,05	2,02	1,96	1,92	1,85	1,80	1,76	1,71	1,67	1,63	1,60	1,57	1,54	1,53
	7,35	5,21	4,34	3,86	3,54	3,32	3,15	3,02	2,91	2,82	2,75	2,69	2,59	2,51	2,40	2,32	2,22	2,14	2,08	2,00	1,97	1,90	1,86	1,84
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,07	2,04	2,00	1,95	1,90	1,84	1,79	1,74	1,69	1,66	1,61	1,59	1,55	1,53	1,51
	7,31	5,18	4,31	3,83	3,51	3,29	3,12	2,99	2,88	2,80	2,73	2,66	2,56	2,49	2,37	2,29	2,20	2,11	2,05	1,97	1,94	1,88	1,84	1,81
42	4,07	3,22	2,83	2,59	2,44	2,32	2,24	2,17	2,11	2,06	1,99	1,94	1,89	1,82	1,78	1,73	1,68	1,64	1,60	1,57	1,51	1,54	1,51	1,49
	7,27	5,15	4,29	3,80	3,49	3,28	3,10	2,96	2,86	2,77	2,70	2,61	2,54	2,46	2,35	2,25	2,17	2,08	2,02	1,94	1,91	1,85	1,80	1,78
44	4,06	3,21	2,82	2,58	2,43	2,31	2,23	2,16	2,10	2,05	2,01	1,98	1,92	1,88	1,81	1,76	1,72	1,66	1,63	1,58	1,56	1,52	1,50	1,48
	7,24	5,12	4,26	3,78	3,46	3,24	3,07	2,94	2,84	2,75	2,68	2,62	2,52	2,44	2,32	2,24	2,15	2,06	2,00	1,92	1,88	1,82	1,78	1,75
46	4,05	3,20	2,81	2,57	2,42	2,30	2,22	2,14	2,09	2,04	2,00	1,97	1,91	1,87	1,80	1,75	1,71	1,65	1,62	1,57	1,54	1,51	1,48	1,48
	7,21	5,10	4,24	3,76	3,44	3,22	3,05	2,92	2,82	2,73	2,66	2,60	2,50	2,42	2,30	2,22	2,13	2,04	1,98	1,90	1,86	1,80	1,76	1,72
48	4,04	3,19	2,80	2,56	2,41	2,30	2,21	2,14	2,08	2,03	1,99	1,96	1,90	1,86	1,79	1,74	1,70	1,64	1,61	1,56	1,53	1,50	1,47	1,45
	7,19	5,08	4,22	3,74	3,42	3,20	3,04	2,90	2,80	2,71	2,64	2,58	2,48	2,40	2,28	2,20	2,11	2,02	1,96	1,88	1,84	1,78	1,73	1,70
50	4,03	3,18	2,79	2,36	2,10	2,29	2,20	2,13	2,07	2,02	1,98	1,95	1,90	1,85	1,78	1,71	1,69	1,63	1,60	1,55	1,52	1,48	1,46	1,44
	7,17	5,06	1,20	3,72	3,11	3,18	3,02	2,88	2,78	2,70	2,62	2,56	2,16	2,39	2,26	2,18	2,10	2,00	1,91	1,86	1,82	1,76	1,71	1,68
55	1,02	3,17	2,78	2,51	2,38	2,27	2,18	2,11	2,05	2,00	1,97	1,93	1,88	1,83	1,76	1,72	1,67	1,61	1,58	1,52	1,50	1,46	1,43	1,41
	7,12	5,01	1,16	3,68	3,37	3,15	2,98	2,83	2,75	2,66	2,59	2,53	2,43	2,35	2,23	2,15	2,00	1,96	1,90	1,82	1,78	1,71	1,66	1,61
60	4,00	3,15	2,76	2,52	2,37	2,23	2,17	2,10	2,01	1,99	1,95	1,92	1,86	1,81	1,75	1,70	1,63	1,59	1,56	1,50	1,48	1,44	1,41	1,39
	7,08	4,98	4,13	3,65	3,31	3,12	2,95	2,82	2,72	2,03	2,56	2,50	2,40	2,32	2,20	2,12	2,03	1,93	1,87	1,79	1,71	1,68	1,63	1,60
65	3,99	3,14	2,75	2,51	2,36	2,24	2,15	2,08	2,02	1,98	1,94	1,90	1,85	1,80	1,74	1,68	1,63	1,57	1,54	1,49	1,46	1,42	1,39	1,37
	7,04	4,95	4,10	3,62	3,34	3,09	2,93	2,79	2,70	2,61	2,54	2,47	2,37	2,30	2,18	2,09	2,00	1,90	1,84	1,76	1,71	1,64	1,60	1,56
70	3,98	3,13	2,74	2,50	2,35	2,32	2,14	2,07	2,01	1,97	1,93	1,89	1,84	1,79	1,72	1,67	1,62	1,56	1,54	1,47	1,45	1,40	1,37	1,35
	7,01	4,92	4,08	3,60	3,29	3,07	2,91	2,77	2,67	2,59	2,51	2,45	2,35	2,28	2,15	2,07	1,98	1,88	1,82	1,74	1,69	1,63	1,56	1,53
80	3,96	3,44	2,72	2,48	2,33	2,21	2,12	2,05	1,99	1,95	1,91	1,88	1,82	1,77	1,70	1,65	1,60	1,54	1,51	1,45	1,42	1,38	1,35	1,32
	6,96	4,88	4,04	3,58	3,25	3,04	2,87	2,74	2,61	2,55	2,48	2,44	2,32	2,24	2,14	2,03	1,94	1,84	1,78	1,70	1,65	1,57	1,52	1,49
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,30	2,19	2,10	2,03	1,97	1,92	1,88	1,85	1,79	1,75	1,68	1,63	1,57	1,51	1,48	1,42	1,39	1,34	1,30	1,28
	6,90	4,82	3,98	3,51	3,20	2,99	2,82	2,65	2,59	2,51	2,43	2,36	2,26	2,19	2,06	1,98	1,89	1,79	1,73	1,64	1,59	1,51	1,46	1,43
125	3,92	3,07	2,68	2,44	2,29	2,17	2,08	2,01	1,95	1,90	1,86	1,83	1,77	1,72	1,65	1,60	1,55	1,49	1,45	1,39	1,36	1,31	1,27	1,25
	6,84	4,78	3,94	3,47	3,17	2,95	2,79	2,65	2,56	2,47	2,40	2,33	2,23	2,15	2,03	1,94	1,85	1,75	1,68	1,59	1,54	1,46	1,40	1,37
150	3,91	3,06	2,67	2,43	2,27	2,16	2,07	2,00	1,94	1,89	1,85	1,82	1,76	1,71	1,64	1,59	1,54	1,47	1,44	1,37	1,34	1,29	1,25	1,22
	6,81	4,75	3,91	3,44	3,13	2,92	2,76	2,62	2,53	2,44	2,37	2,30	2,20	2,12	2,00	1,94	1,82	1,72	1,66	1,56	1,51	1,43	1,37	1,33
200	3,89	3,04	2,65	2,41	2,26	2,14	2,05	1,98	1,92	1,87	1,83	1,80	1,74	1,69	1,62	1,57	1,52	1,45	1,42	1,35	1,32	1,26	1,22	1,19
	6,76	4,74	3,88	3,41	3,11	2,90	2,73	2,60	2,50	2,44	2,34	2,28	2,17	2,09	1,97	1,88	1,79	1,69	1,62	1,53	1,48	1,39	1,33	1,28
400	3,86	3,02	2,62	2,39	2,23	2,12	2,03	1,96	1,90	1,85	1,81	1,78	1,72	1,67	1,60	1,54	1,49	1,42	1,38	1,32	1,28	1,22	1,16	1,13
	6,70	4,66	3,83	3,36	3,06	2,85	2,69	2,55	2,16	2,37	2,29	2,23	2,12	2,04	1,92	1,84	1,74	1,64	1,57	1,47	1,42	1,32	1,24	1,19

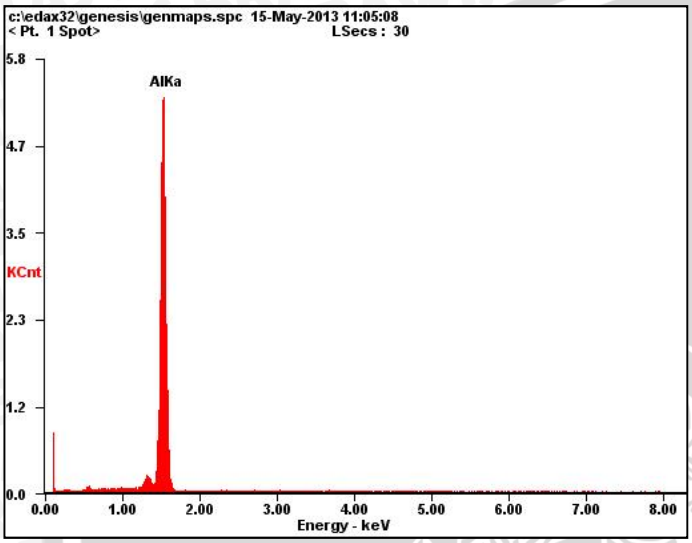
Microanalysis Report

Prepared for:

Prepared by:

6/19/2013

LOGAM Al TITIK 1 (PINGGIR 1)



Element	*Wt%*	*At%*
AlK	100.00	100.00
Matrix	Correction	ZAF

Keterangan:

Wt% : *Weight percent*

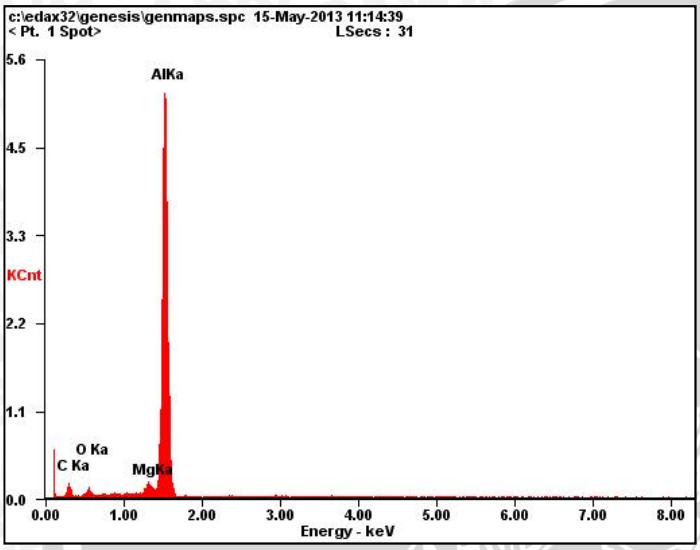
At% : *Atomic percent*

Microanalysis Report

Prepared for:

Prepared by: ***6/19/2013***

LOGAM Al TITIK 2 (TENGAH)



Element	*Wt%*	*At%*
CK	24.88	41.90
OK	03.17	04.01
MgK	01.67	01.39
AlK	70.28	52.70
Matrix	Correction	ZAF

Keterangan:

Wt% : *Weight percent*

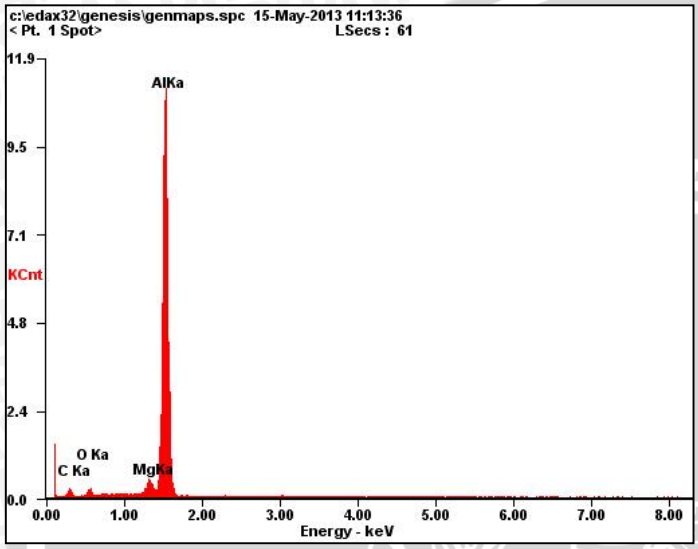
At% : *Atomic percent*

Microanalysis Report

Prepared for:

Prepared by: ***6/19/2013***

LOGAM Al TITIK 3 (PINGGIR 2)



Element	*Wt%*	*At%*
CK	19.01	33.87
OK	03.14	04.21
MgK	01.98	01.74
AlK	75.87	60.18
Matrix	Correction	ZAF

Keterangan:

Wt% : *Weight percent*

At% : *Atomic percent*