



**PENGARUH PUTARAN SPINDEL DAN SUDUT *CHAMFER* TERHADAP
SIFAT MEKANIK ALUMINIUM 6061
PADA *INNERSIDE FRICTION WELDING***

SKRIPSI

Oleh :

**Niko Putra Karunia
NIM 111910101045**

**PROGRAM STUDI STRATA-1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2016**



**PENGARUH PUTARAN SPINDEL DAN SUDUT *CHAMFER* TERHADAP
SIFAT MEKANIK ALUMINIUM 6061
PADA *INNERSIDE FRICTION WELDING***

SKRIPSI

Oleh :
Niko Putra Karunia
NIM 111910101045

**PROGRAM STUDI STRATA-1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2016**



**PENGARUH PUTARAN SPINDEL DAN SUDUT *CHAMFER* TERHADAP
SIFAT MEKANIK ALUMINIUM 6061
PADA *INNERSIDE FRICTION WELDING***

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh :
Niko Putra Karunia
NIM 111910101045

**PROGRAM STUDI STRATA-1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2016**

PERSEMBAHAN

Dengan menyebut Allah SWT Yang Maha Pengasih dan Penyayang, saya persembahkan skripsi saya ini dengan segala cinta dan kasih kepada :

1. Orang tua saya Ayahanda Karsidi dan Ibunda Khusnul Kodiyah yang telah bekerja keras dan berkorban, mencurahkan cinta dan kasih sayangnya, tidak pernah berhenti mendoakan saya dan memberi semangat serta motivasi dalam menyelesaikan karya tulis ilmiah (Skripsi) ini.
2. Kakak tercinta Devi Karmilasari S.E. dan Aries Karniawan S.Pt. yang selalu memberikan semangat dan doa;
3. Keluarga besar saya yang selalu memberi dukungan, semangat, motivasi, doa, serta cinta dan kasih sayangnya kepada saya.
4. Deni Parmana S.Pd. anggota keluarga baru, calon istriku yang tak kenal lelah untuk selalu menemani, memberi dukungan, semangat, motivasi, doa dan kasih sayang disetiap kegiatan akademik maupun non akademik saya;
5. Agung Widodo S.T., Faisal Karamy S.T., dan Itok Denis P. yang sudah memberikan dorongan serta motivasi semasa kuliah dan skripsi.

MOTTO

“Gantungkan cita-citamu setinggi langit. Bermimpilah setinggi langit. Jika engkau jatuh, engkau akan jatuh diantara bintang-bintang”

(Ir. Soekarno)

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

(QS. Al-Insyirah: 5)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Niko Putra Karunia

NIM : 111910101045

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “**PENGARUH PUTARAN SPINDEL DAN SUDUT *CHAMFER* TERHADAP SIFAT MEKANIK ALUMINIUM 6061 PADA *INNERSIDE FRICTION WELDING*”** adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 21 Juni 2016
Yang menyatakan,

(Niko Putra Karunia)
NIM 111910101045

SKRIPSI

**PENGARUH PUTARAN SPINDEL DAN SUDUT *CHAMFER* TERHADAP
SIFAT MEKANIK ALUMINIUM 6061 PADA *INNERSIDE FRICTION*
*WELDING***

Oleh

Niko Putra Karunia

111910101045

Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama : Sumarji, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Santoso Mulyadi, S.T., M.T

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Pengaruh Putaran Spindel dan Sudut *Chamfer* Terhadap Sifat Mekanik Aluminium 6061 Pada *Innerside Friction Welding*” telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Selasa, 21 Juni 2016

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji,

Ketua,

Sekretaris,

Sumarji, S.T., M.T.
NIP 196802051997021001

Santoso Mulyadi, S.T., M.T.
NIP 19702281997021001

Anggota I,

Anggota II,

Dedi Dwi Laksana, S.T., M.T.
NIP 196912011996021001

Dr. Agus Triono, S.T., M.T.
NIP 197008072002121001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM.
NIP 196612151995032

RINGKASAN

Pengaruh Putaran Spindel dan Sudut *Chamfer* Terhadap Sifat Mekanik Aluminium 6061 pada *Innerside Friction Welding*; Niko Putra Karunia; 111910101045; 2016; 93 Halaman; Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Aluminium 6061 adalah salah satu jenis material aluminium yang banyak digunakan dalam dunia industri. Metode yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan penyambungan aluminium adalah *friction welding*. Pada *friction welding* proses penyambungan logam terjadi tanpa pencairan (solid state process), yang mana proses pengelasan terjadi sebagai akibat penggabungan antara putaran salah satu benda kerja dengan gaya tekan yang dilakukan oleh benda kerja yang berputar.

Friction welding ini mempunyai beberapa parameter penting yang dapat mempengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro hasil lasan. Parameternya antara lain : waktu gesek, putaran spindel, tekanan gesek, tekanan tempa dan sudut *chamfer*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari variasi putaran spindel dan kecepatan putar terhadap sifat mekanik dari aluminium 6061.

Hasil pengujian tarik tertinggi diperoleh dari variasi 1000 rpm dengan sudut *chamfer* 30^0 dengan nilai sebesar $111,45 \text{ N/mm}^2$. Sementara hasil pengujian tarik terendah diperoleh dari variasi 600 rpm dengan sudut *chamfer* 0^0 sebesar $25,95 \text{ N/mm}^2$. Hasil pengujian kekerasan tertinggi diperoleh dari variasi 1000 rpm dengan sudut *chamfer* 30^0 dengan nilai masing-masing *Zud* 104 BHN, *Zpd* 125 BHN dan *Zpl* 107 BHN. Cacat las terbesar pada variasi sudut *chamfer* 0^0 .

SUMMARY

Effect of Spindle Rotation and Chamfer Angle to Mechanical Properties of Aluminum 6061 on Innerside Friction Welding; Niko Putra Karunia; 111910101045; 2016; 93 Pages; Mechanical Engineering, Technical Faculty, University of Jember.

Aluminum 6061 is one type of aluminum material that is widely used in industry. The method can be used to overcome the problems of connecting the aluminum is friction welding. In the friction welding process of joining metals occur without melting (solid state process), in which the welding process occurs as a result of merging between rounds one specimen with pressure applied by the rotating specimen.

Friction welding has some important parameters that can affect the mechanical properties and microstructure of welds results. The parameters include: time of friction, spindle rotation, friction pressure, forging pressure and chamfer angle. This study aims to determine the effect of variations in the corner chamfer and spindle rotation on mechanical properties of 6061.

The highest tensile test results obtained from variation 1000 rpm with a chamfer angle 30° with the value of 111.45 N/mm^2 . While the lowest tensile test results obtained from variation 600 rpm with a chamfer angle 0° the value of 25.95 N/mm^2 . The highest hardness testing results obtained from variation 1000 rpm with a chamfer angle of 30° with the value of each Zud 104 BHN, Zpd 125 BHN and Zpl 107 BHN. The welding defects in the variation of the angle chamfer 0° .

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT. atas segala rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “Pengaruh Kecepatan Putar dan Sudut *Chamfer* Terhadap Sifat Mekanik Aluminium 6061 Pada *Innerside Friction Welding*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT. yang telah memberikan nikmat dan karunia yang tidak pernah henti dapat penulis rasakan setiap detik dalam hidup ini.
2. Ayahanda Karsidi dan Ibunda Khusnul Kodiyah tercinta yang senantiasa memberikan semangat, dorongan, kasih sayang dan pengorbanan yang tiada batas hingga saat ini serta doa yang tiada hentinya beliau haturkan dengan penuh keikhlasan;
3. Kakak tercinta Devi Karmilasari S.E. dan Aries Karniawan S.Pt. yang selalu setia menyemangati serta memberikan motivasi.
4. Dosen tersabar Bapak Sumarji, S.T., M.T. dan Bapak Santoso Mulyadi, S.T., M.T. yang rela meluangkan waktunya untuk membimbing sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
5. Bapak Dedi Dwi Laksana S.T., M.T. dan Dr. Agus Triono, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang tak lelah memberikan kritik dan saran sehingga penelitian dan penulisan ini menjadi lebih baik.
6. Bapak Hary Sutjahjono, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing akademik saya

7. Semua dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember yang senantiasa memberikan ilmunya. Semoga ilmu yang Bapak/Ibu berikan bermanfaat dan barokah untukku dan untuk pribadi masing-masing serta menjadi amalan penolong Bapak/Ibu kelak;
8. Saudaraku Teknik Mesin 2011 Universitas Jember yang selalu memberikan motivasi dan semangat persaudaraan selama perkuliahan hingga saat ini dan teruslah bersaudara hingga kita bisa berbagi kesenangan dan kebahagiaan lagi di surga-NYA kelak, panjang umur dan berbahagialah saudaraku;
9. Seduluran Teknik, asisten lab serta adik-adik angkatan yang dirasa membantu dalam proses kuliah dan kehidupan.
10. Orang terkasih Deni Parmana S.Pd. yang tak kenal lelah untuk selalu menemani, memberi semangat, motivasi, doa dan kasih sayang disetiap kegiatan akademik maupun non akademik saya;
11. Sahabat seperjuangan Agung Widodo S.T., Faisal Karamy S.T., dan Itok Denis P. (masih dalam proses SARJANA yang mengajak wisuda bareng) yang selalu menemani, memberi semangat, dan ngajak begadang sampai pagi;
12. Rekan-rekan UKM Go-Kart dan Mobil Irit Tawang Alun yang menjadi wadah kreatifitas saya semasa kuliah;
13. Dulur-dulu PATRANG COMMUNITY yang menjadi tempat singgah dan berkeluh kesah;
14. Dulur-dulur Jember Street Fire Community yang menjadi keluarga baru di Jember;
15. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL	ii
PERSEMBAHAN.....	iii
MOTTO	iv
PERNYATAAN.....	v
PEMBIMBING.....	vi
PENGESAHAN.....	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
PRAKATA.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Aluminium dan Paduannya.....	6
2.3 Sifat Mampu Las Aluminium.....	7
2.4 Paduan Al-Mg-Si.....	8

2.5 Pengertian Pengelasan	10
2.6 Friction Welding (Pengelasan Gesek)	10
2.6.1 <i>Friction Stir Welding</i>	11
2.6.2 <i>Linier Friction Welding</i>	11
2.7 Kelebihan Friction Welding	13
2.8 Pengujian Tarik.....	14
2.8.1 Perilaku Mekanik Material.....	15
2.8.2 Metode Perpatahan Material	21
2.9 Pengujian Kekerasan	22
2.9.1 Metode Indentasi	24
2.9.2 Metode Brinell.....	24
2.10 Pengujian Metalografi	26
2.10.1 <i>Cutting</i> (Pemotongan)	26
2.10.2 <i>Mounting</i>	27
2.10.3 <i>Grinding</i> (Pengamplasan)	28
2.10.4 <i>Polishing</i> (Pemolesan)	29
2.10.5 <i>Etching</i> (Etsa).....	29
2.11 Hipotesis	30
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	31
3.1 Metode Penelitian	31
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	31
3.3 Bahan dan Alat Penelitian.....	31
3.3.1 Bahan.....	31
3.3.2 Alat	32
3.4 Variabel Penelitian	32
3.4.1 Variabel bebas	32
3.4.2 Variabel Terikat.....	33
3.4.3 Variabel Kontrol.....	33

3.5 Proses Pengelasan.....	33
3.6 Proses Pengujian	34
3.6.1 Pengujian Tarik	34
3.6.2 Pengujian Kekerasan.....	35
3.6.3 Pengamatan Struktur Mikro	35
3.7 Teknik Penyajian Data	36
3.8 Diagram Alir Penelitian.....	37
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1 Hasil Pengamatan Makro dan Mikro.....	38
4.1.1 Pengamatan Makro.....	38
4.1.2 Perpatahan Benda Kerja.....	42
4.1.3 Pengamatan Mikro	45
4.2 Hasil dan Pembahasan Uji Tarik.....	51
4.3 Hasil dan Pembahasan Uji Kekerasan	53
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	64

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
2.1	Sifat Aluminium Paduan Al-Mg-Si	9
4.1	Komposisi Kimia Al 6061	50
4.2	Rata-Rata Hasil Pengujian Tarik.....	52
4.3	Hasil Pengujian Kekerasan Variasi Parameter Sudut <i>Chamfer</i> 0 ⁰	55
4.4	Hasil Pengujian Kekerasan Variasi Parameter Sudut <i>Chamfer</i> 30 ⁰	55

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
2.1	Diagram Fase Magnesium-Silikon Pada Paduan Aluminium.....	9
2.2	<i>Stir Friction Welding</i>	11
2.3	<i>Linier Friction Welding</i>	12
2.4	Bentuk Benda Kerja <i>Innerside Friction Welding</i>	13
2.5	Bagian Sambungan Las Gesek.....	14
2.6	Spesimen Uji Tarik	15
2.7	Kurva Tegangan-Regangan Dari Sebuah benda Uji Terbuat Baja Ulet.....	16
2.8	Kurva Tegangan-Regangan Dari Sebuah Benda Uji Terbuat Dari Bahan Getas.....	18
2.9	Perbandingan Antara Kurva Tegangan-Regangan Rekayasa dan Sesungguhnya Dari Baja Karbon Rendah (<i>Mild Steel</i>).....	21
2.10	Ilustrasi Penampang Samping Bentuk Perpatahan Bneda Uji Tarik Sesuai Dengan Tingkat Keuletan/Kegetasan	22
2.11	Hubungan Antara Kekerasan dan Kekuatan Tarik Pada Besi Cor, Tembaga dan Baja.....	23
2.12	Skematis Prinsip Indentasi Dengan Metode Brinell	25
2.13	Hasil Indentasi Brinell Berupa jejak Berbentuk Lingkaran Dengan Ukuran Diameter Dalam Skala Milimeter	26
3.1	Skema Alat <i>FrictionWelding</i>	34
3.2	Diagram Alir Penelitian	37
4.1	Foto Makro Dengan Variasi <i>Chamfer</i> 0 ⁰ /600 rpm.....	39
4.2	Foto Makro Dengan Variasi <i>Chamfer</i> 30 ⁰ /600 rpm.....	39

4.3	Foto Makro Dengan Variasi <i>Chamfer</i> 0 ⁰ /800 rpm.....	40
4.4	Foto Makro Dengan Variasi <i>Chamfer</i> 30 ⁰ /800 rpm.....	40
4.5	Foto Makro Dengan Variasi <i>Chamfer</i> 0 ⁰ /1000 rpm.....	41
4.6	Foto Makro Dengan Variasi <i>Chamfer</i> 30 ⁰ /1000 rpm.....	41
4.7	Hasil Patahan Uji Tarik Tampak Samping (a) dan Tampak Depan (b) Tanpa Mengalami Proses Pengelasan	43
4.8	Hasil Patahan Uji Tarik: (a) 600rpm/0 ⁰ Tampak Samping; (b) 600rpm/0 ⁰ Tampak Depan; (c) 800rpm/0 ⁰ Tampak Samping; (d) 800rpm/0 ⁰ Tampak Depan; e) 1000rpm/0 ⁰ Tampak Samping; (f) 1000rpm/0 ⁰ Tampak Depan	44
4.9	Hasil Patahan Uji Tarik: (a) 600rpm/30 ⁰ Tampak Samping; (b) 600rpm/30 ⁰ Tampak Depan; (c) 800rpm/30 ⁰ Tampak Samping; (d) 800rpm/30 ⁰ Tampak Depan; (e) 1000rpm/30 ⁰ Tampak Samping; (f) 1000rpm/30 ⁰ Tampak Depan	45
4.10	Foto mikro dengan variasi <i>chamfer</i> 0 ⁰ / 600 rpm.....	46
4.11	Foto mikro dengan variasi <i>chamfer</i> 0 ⁰ / 800 rpm.....	47
4.12	Foto mikro dengan variasi <i>chamfer</i> 0 ⁰ / 1000 rpm.....	47
4.13	Foto mikro dengan variasi <i>chamfer</i> 30 ⁰ / 600 rpm.....	48
4.14	Foto mikro dengan variasi <i>chamfer</i> 30 ⁰ / 800 rpm.....	49
4.15	Foto mikro dengan variasi <i>chamfer</i> 30 ⁰ / 1000 rpm.....	49
4.16	Struktur Mikro Daerah Sambungan <i>friction Welding</i>	51
4.17	Grafik Nilai Rata-Rata UTS.....	53
4.18	Grafik Hasil Pengujian Kekerasan Dengan Variasi Sudut <i>Chamfer</i> 0 ⁰	56
4.19	Grafik Hasil Pengujian Kekerasan Dengan Variasi Sudut <i>Chamfer</i> 30 ⁰	56

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
A.	Spesimen Al 6061 Sebelum Dilakukan Proses Pengelasan	63
B.	Proses Pengelasan <i>Friction Welding</i>	66
C.	Hasil Pengelasan <i>Friction Welding</i> Al 6061	67
D.	Spesimen yang Sudah Siap Dilakukan Uji Tarik	70
E.	Spesimen yang Sudah Siap Dilakukan Uji Mikro dan Kekerasan	70
F.	Pengujian Tarik.....	71
G.	Pengujian Kekerasan	71
H.	Pengujian Struktur Mikro.....	72
I.	Data Hasil Uji Tarik.....	73
J.	Perhitungan Pengujian Tarik	73
K.	Data Hasil Uji Kekerasan.....	74
L.	Hasil Perhitungan Uji Kekerasan.....	74

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada zaman sekarang, terdapat banyak metode yang dapat dilakukan untuk menyambungkan logam. Dalam prosesnya, tidak semua logam mudah untuk dilakukan penyambungan dengan menggunakan logam pengisi, salah satu contohnya aluminium. Dengan perkembangan teknologi penyambungan logam, banyak ditemukan metode baru untuk mengatasi permasalahan dalam proses penyambungan logam, salah satunya yaitu *friction welding* (pengelasan gesek).

Friction welding merupakan metode penyambungan logam tanpa menggunakan logam pengisi, yang mana proses penyambungan terjadi akibat adanya penggabungan antara laju putaran dari salah satu benda kerja dengan gaya tekan yang dilakukan oleh benda kerja lain terhadap ujung benda kerja yang berputar. Akibat dari proses tersebut, maka ujung benda kerja tersebut akan menimbulkan gesekan yang terjadi diantara kedua ujung benda kerja. Menurut Astrom, P. (2001), bahwa gesekan yang diakibatkan oleh pertemuan kedua benda kerja akan menghasilkan panas yang dapat melumerkan kedua ujung benda kerja yang bergesekan dan akhirnya terjadi proses penyambungan.

Keuntungan dari proses *friction welding* ini adalah penghematan material serta memerlukan waktu yang cepat untuk menyambungkan dua material yang sama maupun berbeda. *Friction welding* juga dapat menyambungkan material yang bulat maupun tidak bulat. Dalam *friction welding* ada beberapa parameter yang perlu diperhatikan yaitu ; waktu gesek, tekanan gesek, putaran spindel, waktu tempa dan tekanan tempa. Faktor lain yang turut mempengaruhi hasil las gesek adalah sudut *chamfer*.

Dalam perkembangannya terdapat beberapa macam *friction welding*, salah satunya adalah *innerside friction welding*. *Innerside friction welding* adalah

pengelasan gesek dengan model sambungan kedua sisi material dibentuk berpasangan. Sisi pertama dibuat *chamfer* pada bagian depan benda dan sisi yang lainnya *chamfer* dibuat pada bagian dalam benda. Dengan model sambungan seperti ini diharapkan dapat meningkatkan kekuatan sambungan dari material yang akan disambungkan.

Anggara, F. (2012), dalam penelitiannya melakukan pengelasan gesek pada material aluminium paduan. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa cacat *porositas* terbesar terdapat pada hasil pengelasan dengan *rotation speed* 1800 rpm. Hasil pengujian tarik terbesar terjadi pada pengelasan dengan menggunakan *rotation speed* 800 rpm sebesar 108.81 MPa. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa logam las kekerasannya lebih rendah daripada logam induk. Rata-rata nilai kekerasan paling besar terjadi pada pengelasan dengan *rotation speed* 800 yaitu sebesar 71.667 BHN pada base metal, 63.333 BHN di daerah HAZ, 67 BHN di weld metal.

Susilo, T. P. (2011), dalam penelitiannya menunjukkan bahwa sudut *chamfer* dan *upset loading* berpengaruh terhadap kekuatan puntir sambungan *innerside friction welding*. Kekuatan puntir terbesar dihasilkan oleh produk dengan sudut *chamfer* 20° dengan *upset loading* 180 kgf sebesar 33,354 N/mm². Hal ini dikarenakan semakin sempit luas permukaan kontak sambungan las, maka kekuatan puntirnya akan menurun seiring semakin sempit permukaan kontak benda kerja yang saling bergesekan pada saat terjadinya pengelasan. Seiring bertambahnya nilai *upset loading*, maka kekuatan puntirnya cenderung menurun. Hal ini dikarenakan semakin tinggi nilai *upset loading* maka tekanan yang dihasilkan semakin besar sehingga panas yang dihasilkan semakin tinggi dan dapat menurunkan daya puntir antar butiran logam yang akan mempengaruhi kekuatan puntir dari Al-Mg-Si.

Santoso, E. B. (2012), menganalisis kekuatan tarik dan porositas dari hasil *Innerside Friction Welding* dengan aluminium paduan Al-Mg-Si. Penelitian ini menggunakan sudut *chamfer* 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, dengan penekanan 157 kgf, 185 kgf, 213 kgf. Dalam penelitiannya didapatkan hasil bahwa kekuatan tarik akan

meningkat seiring dengan semakin kecilnya sudut *chamfer* dan semakin besar gaya tekan akhir, dan porositas menurun dengan bertambahnya sudut *chamfer* dan gaya tekan akhir.

Dalam penelitian ini digunakan material paduan aluminium seri 6061 yaitu aluminium paduan Al-Mg-Si. Dimana aluminium paduan ini memiliki sifat ketahanan korosi, mampu potong dan mampu las yang cukup baik. Namun, sifat yang kurang baik dari paduan ini adalah terjadinya pelunakan pada daerah las sebagai akibat dari panas yang ditimbulkan (Wiryo Sumarto, H., dkk., 2000). Dari beberapa penelitian diatas masih belum diketahui pengaruh putaran spindel dan sudut *chamfer* pada *innerside friction welding*. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari *innerside friction welding* dengan variasi putaran spindel dan sudut *chamfer* terhadap sifat mekanik dari aluminium paduan Al-Mg-Si.

1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan diantaranya adalah :

1. Bagaimana kekuatan tarik hasil pengelasan *Innerside Friction Welding* Aluminium paduan Al-Mg-Si dengan variasi putaran spindel dan sudut *chamfer*?
2. Bagaimana struktur mikro hasil pengelasan *Innerside Friction Welding* Aluminium paduan Al-Mg-Si dengan variasi putaran spindel dan sudut *chamfer*?
3. Bagaimana kekerasan hasil pengelasan *Innerside Friction Welding* Aluminium paduan Al-Mg-Si dengan variasi putaran spindel dan sudut *chamfer*?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat mencapai tujuan yang diinginkan, maka batasan masalah yang diberikan adalah sebagai berikut :

1. Tidak membahas distribusi temperatur pada proses pengelasan gesek.
2. Tegangan sisa yang terjadi pada proses pengelasan diabaikan.

3. Kekasaran permukaan benda kerja yang akan di las diasumsikan sama.
4. Gesekan yang terjadi pada pengukur tekanan diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang akan diteliti, tujuan yang ingin dicapai diantaranya adalah :

1. Mengetahui pengaruh variasi putaran spindel dan sudut *chamfer* terhadap kekuatan tarik sambungan *Innerside Friction Welding* pada Aluminium paduan Al-Mg-Si.
2. Mengetahui pengaruh variasi putaran spindel dan sudut *chamfer* terhadap struktur mikro sambungan *Innerside Friction Welding* pada Aluminium paduan Al-Mg-Si.
3. Mengetahui pengaruh variasi putaran spindel dan sudut *chamfer* terhadap kekerasan sambungan *Innerside Friction Welding* pada Aluminium paduan Al-Mg-Si.

1.5 Manfaat Penelitian

Setelah dilakukan penelitian ini diharapkan dapat membawa manfaat, diantaranya adalah :

1. Dapat mengaplikasikan teori yang didapat selama perkuliahan khususnya yang berhubungan dengan pengelasan logam.
2. Memberikan informasi mengenai alternatif penyambungan aluminium yang mudah dan murah.
3. Sebagai usaha pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang terus berkembang seiring dengan perkembangan zaman.
4. Sebagai dasar acuan sehingga dapat dilakukan penelitian lebih lanjut.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Anggara, F. (2012), menganalisis kekuatan tarik, kekerasan dan struktur mikro hasil pengelasan *linear friction welding* pada aluminium paduan Al-Mg-Si. Pada penelitian ini digunakan variasi *rotation speed* mesin 800 rpm, 1300 rpm, 1800 rpm. Dalam penelitiannya didapatkan hasil bahwa cacat *porositas* terbesar terdapat pada hasil pengelasan dengan *rotation speed* 1800 rpm. Hasil pengujian tarik terbesar terjadi pada pengelasan dengan menggunakan *rotation speed* 800 rpm sebesar 108.81 MPa. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa logam las kekerasannya lebih rendah daripada logam induk. Rata-rata nilai kekerasan paling besar terjadi pada pengelasan dengan *rotation speed* 800 yaitu 67 BHN.

Susilo, T. P. (2011), menganalisis kekuatan puntir dari *innerside friction welding* dengan aluminium paduan Al-Mg-Si. Dari hasil penelitiannya menunjukkan bahwa sudut *chamfer* dan *upset loading* berpengaruh terhadap kekuatan puntir sambungan *innerside friction welding*. Kekuatan puntir terbesar dihasilkan oleh produk dengan sudut *chamfer* 20° dengan *upset loading* 180 kgf sebesar 33,354 N/mm². Hal ini dikarenakan semakin sempit luas permukaan kontak sambungan las, maka kekuatan puntirnya akan menurun seiring semakin sempit permukaan kontak benda kerja yang saling bergesekan pada saat terjadinya pengelasan. Seiring bertambahnya nilai *upset loading*, maka kekuatan puntirnya cenderung menurun. Hal tersebut terjadi karena semakin tinggi nilai *upset loading* maka tekanan yang dihasilkan semakin besar sehingga panas yang dihasilkan semakin tinggi dan dapat menurunkan daya puntir antar butiran logam yang akan mempengaruhi kekuatan puntir.

Santoso, E. B. (2012), menganalisis kekuatan tarik dan porositas dari hasil *Innerside Friction Welding* dengan aluminium paduan Al-Mg-Si. Penelitian ini

menggunakan sudut *chamfer* 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, dengan penekanan 157 kgf, 185 kgf, 213 kgf. Dalam penelitiannya didapatkan hasil bahwa kekuatan tarik akan meningkat seiring dengan semakin besarnya sudut *chamfer* dan semakin besar gaya tekan akhir, dan porositas menurun dengan bertambahnya sudut *chamfer* dan gaya tekan akhir.

2.2 Aluminium dan Paduannya

Aluminium merupakan logam ringan yang mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik serta sifat-sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Adanya penambahan Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, dan sebagainya akan meningkatkan kekuatan mekanik aluminium (Surdia, T., dkk., 2000). Penambahan unsur paduan dilakukan untuk memperbaiki sifat dari Aluminium seperti yang dikehendaki. Sifat unsur paduan ini akan mempengaruhi kualitas dari Aluminium. Berikut ini adalah beberapa pengaruh penambahan unsur paduan dalam Aluminium, yaitu:

a. Tembaga (Cu)

Penambahan unsur Tembaga (Cu) akan memperbaiki kualitas pengerjaan mesin pada Aluminium. Selain itu, dengan atau tanpa paduan yang lain akan meningkatkan kekuatan dan ketahanan korosinya serta kekerasannya.

b. Silikon (Si)

Pengaruh paling penting dalam penambahan Silikon adalah sifat mampu cor. Dalam hal ini yang dapat diperbaiki adalah dengan cara mengurangi penyusutan coran sampai satu setengah dari penyusutan Aluminium murni. Selain itu, paduan Silikon akan meningkatkan ketahanan korosi, baik ditambah unsur lain ataupun tidak.

c. Magnesium (Mg)

Penambahan Magnesium (Mg) digunakan untuk meningkatkan daya tahankarat Aluminium. Bila dipadukan dengan Silikon maka daya tahan karatnya

semakin besar. Unsur Magnesium juga meningkatkan sifat mampu mesin dan mampu bentuk dari Aluminium.

d. Besi (Fe)

Penambahan Besi (Fe) dimaksudkan untuk mengurangi penyusutan. Tetapi kandungan Besi yang besar juga akan menyebabkan struktur butir yang kasar dan dalam hal ini dapat diperbaiki dengan menambah sejumlah kecil Mn dan Cr.

e. Mangan (Mn)

Penambahan Mangan akan meningkatkan daya tahan karat Aluminium dan bila dipadukan dengan Mg akan memperbaiki kekuatan Aluminium.

2.3 Sifat Mampu Las Aluminium

Dalam hal pengelasan paduan Aluminium mempunyai sifat yang kurang baik bila dibandingkan dengan baja. Sifat-sifat yang kurang baik ini antara lain:

1. Karena daya hantar panasnya tinggi maka sulit sekali untuk memanaskan atau mencairkan hanya sebagian dari dimensinya.
2. Paduan Aluminium mudah teroksidasi dan membentuk Oksida Aluminium (Al_2O_3) yang mempunyai titik cair tinggi. Karena sifat ini maka peleburan antara logam dasar dan logam las menjadi terhalang.
3. Mempunyai koefisien muai yang tinggi, sehingga mudah sekali mengalami deformasi.
4. Perbedaan yang tinggi antara kelarutan Hidrogen dalam logam cair dan logam padat, sehingga dalam proses pengelasan dan pendinginan yang cepat menyebabkan terperangkapnya gas Hidrogen dan membentuk rongga halus di dalam hasil lasan (Wiryosumarto, H., dkk., 2000).

Beberapa jenis paduan Aluminium yang mempunyai sifat mampu las yang baik antara lain:

1. Jenis Aluminium murni dan paduan Al-Mn

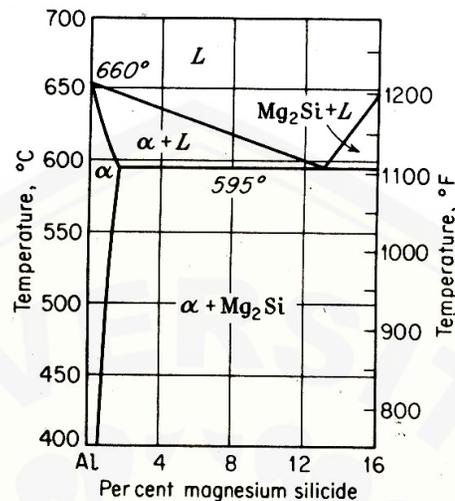
2. Jenis paduan Al-Mg
3. Jenis paduan Al-Zn-Mg
4. Jenis paduan Al-Mg-Si

Sedangkan paduan Al-Cu dan paduan Al-Zn memiliki sifat mampu las yang kurang (Wiryosumarto, H., dkk., 2000).

2.4 Paduan Al-Mg-Si

Paduan Aluminium – Magnesium - Silikon termasuk dalam jenis yang dapat diperlakukan panas dan mempunyai sifat mampu potong, mampu las dan tahan korosi yang cukup baik (Wiryosumarto, H., dkk., 2000). Jika Magnesium dan Silikon dipadukan bersama Aluminium, maka akan terbentuk Magnesium Silikat (Mg_2Si), kebanyakan paduan Aluminium mengandung Si, sehingga penambahan Magnesium diperlukan untuk memperoleh efek pengerasan dari Mg_2Si . Tetapi sifat paduan ini akan menjadi getas, sehingga untuk mengurangi hal tersebut, penambahan dibatasi antara 0,03% - 0,1% (Heine, R. W., 1995).

Logam paduan murni dan coran yang diperlakukan panas mengandung beberapa fase terlarut yang muncul dalam jumlah dan lokasi yang bervariasi dalam mikrostruktur bergantung pada temperatur spesimen. Pada seri paduan 6xxx, fase intermetalik yang umum adalah Mg_2Si . Kelebihan partikel silikon mungkin juga terjadi. Diagram fase Magnesium - Silikon pada paduan Aluminium ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram Fase Magnesium - Silikon pada paduan Aluminium
(Sumber : Hiene, R. W., 1995)

Diagram Fase magnesium - Silikon pada Gambar 2.1 menunjukkan bahwa kelarutan Mg_2Si semakin menurun terhadap kelarutan Aluminium yakni dari temperatur tinggi ke temperatur rendah. Kelarutan Mg_2Si dalam Aluminium/fasa α terjadi sampai 16% pada $595^\circ C$. Selain itu, titik cair terendah untuk mencairkan Al-Mg-Si pada temperatur $595^\circ C$ dengan komposisi 13% Mg_2Si dan 87% Al (Surdia, T., 2000). Beberapa sifat yang dimiliki paduan Al-Mg-Si ditunjukkan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Sifat Aluminium Paduan Al-Mg-Si

Sifat	Nilai
<i>Kekuatan tarik</i>	12,6 kgf/mm ²
<i>Kekuatan mulur</i>	5,6 kgf/mm ²
<i>Perpanjangan</i>	30 %
<i>Kekuatan geser</i>	8,4 kgf/mm ²
<i>Kekerasan Brinell</i>	30 BHN
<i>Batas leleh</i>	6,3 kgf/mm ²

(Sumber : Surdia, T., 2000)

2.5 Pengertian Pengelasan

Pengelasan (*welding*) adalah suatu proses penyambungan logam dimana logam menjadi satu akibat panas dengan atau tanpa pengaruh tekanan. Atau dapat juga didefinisikan sebagai ikatan metalurgi yang ditimbulkan oleh gaya tarik menarik antara atom (Amstead, B. H., dkk., 1989). Pengelasan juga dapat dikatakan sebagai salah satu teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dengan atau tanpa penambahan logam pengisi dan dengan atau tanpa tekanan sehingga dapat menghasilkan suatu sambungan. Dalam proses pengelasan salah satu faktor yang menyebabkan logam dapat tersambung karena adanya panas. Sumber panas dapat diperoleh dari gas, resistansi listrik, sinar elektron, induksi, ledakan dan gesekan.

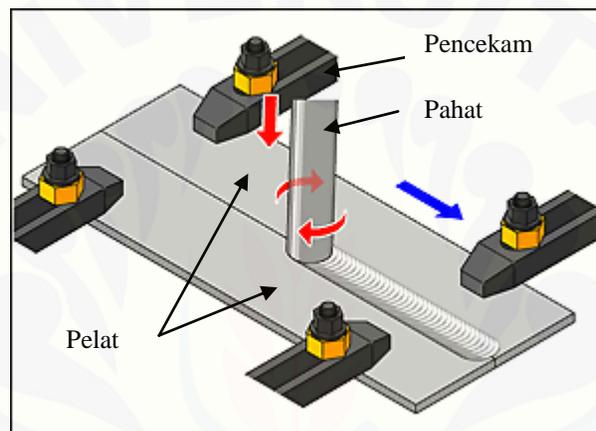
Beberapa faktor yang dapat mengakibatkan timbulnya panas salah satunya adalah gesekan. Menurut Astrom P. (2001), bahwa gesekan yang diakibatkan oleh pertemuan kedua benda kerja akan menghasilkan panas. Panas yang timbul dari gesekan tersebut dapat melumerkan kedua ujung benda kerja yang bergesekan dan akhirnya terjadi proses penyambungan.

2.6 *Friction Welding* (Pengelasan Gesek)

Pengelasan gesek (*friction welding*) merupakan salah satu metode penyambungan material secara *metalurgis* yang terjadi akibat adanya panas yang timbul dari gesekan antara permukaan material yang diputar dengan permukaan material yang ditekan dengan gaya tekan tertentu. Penyambungan akan terjadi saat titik cair kedua material telah tercapai, sehingga tidak diperlukan pencairan material yang terlalu banyak untuk penyambungannya. Pada pengelasan gesek terjadi proses penyambungan yang kompleks, karena didalamnya terdapat fenomena fisik, perubahan panas akibat gesekan, deformasi plastis, perubahan struktur dan sebagainya (Susilo, T. P., 2011). Klasifikasi dari *friction welding* berdasarkan metode penggesekannya antara lain:

2.6.1 Friction Stir Welding

Friction welding yang sumber panasnya berasal dari gesekan antara benda kerja dan pahat. Metode las gesek yang memanfaatkan gesekan antara benda kerja dengan pahat ditunjukkan pada Gambar 2.2. Umumnya proses ini digunakan untuk penyambungan pelat. Kedua pelat yang akan disambung dicekam berimpit, kemudian pahat berputar dan menekan diatas himpitan tersebut sehingga terjadi gesekan dan menimbulkan panas yang akan melumerkan sambungan pelat.



Gambar 2.2 Stir Friction Welding
(Sumber : www.m-osaka.com, 2015)

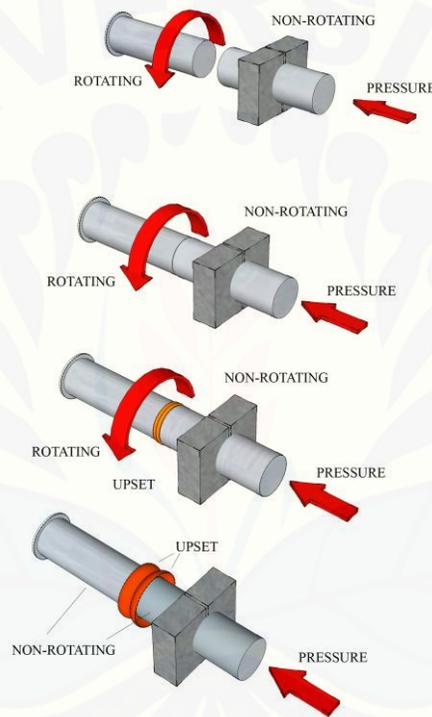
2.6.2 Linier Friction Welding

Friction welding yang sumber panasnya berasal dari gesekan kedua permukaan benda kerja itu sendiri. Metode las gesek yang memanfaatkan gesekan langsung antara dua permukaan benda kerja yang akan dilas (Anggara, F. 2012). Mekanisme kerja *linier friction welding* adalah sebagai berikut:

- Terdapat dua bagian benda kerja yang salah satu benda kerjanya berputar relatif dengan kecepatan tertentu terhadap benda kerja yang lainnya, dimana benda kerja yang satu diberikan tekanan.
- Gesekan antara kedua permukaan akan menghasilkan panas yang akan melelehkan ujung permukaan benda kerja.

- c. Tekanan terus diberikan hingga lelehan kedua permukaan menyatu dan membentuk sambungan.
- d. Jika kedua permukaan telah menyatu, putaran dihentikan dan pada sisi tekan diberikan tekanan tambahan untuk menghasilkan sambungan yang sempurna.

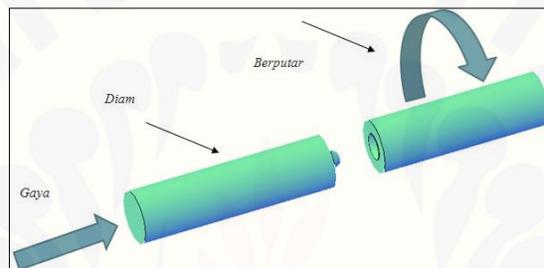
Mekanisme kerja *linier friction welding* ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 *Linier Friction Welding*
(Sumber : Susilo, T. P., 2011)

Namun pada kenyataannya, *linier friction welding* masih dapat menimbulkan cacat pada hasil benda kerja yang di las. Dengan berkembangnya pengetahuan dalam pengelasan, maka timbul suatu metode *friction welding* dengan menambahkan *innerside* pada kedua ujung benda kerja. Metode pengelasan ini biasa disebut dengan *innerside friction welding*.

Metode pengelasannya pada dasarnya sama dengan *linier friction welding*. Namun yang membedakan dari *innerside friction welding* yaitu bentuk dari ujung benda kerja yang dibentuk berpasangan. Sisi pertama dibuat dengan *menchamfer* bagian depan benda dan sisi yang lainnya *menchamfer* bagian dalam benda (Susilo, T. P., 2011). Bentuk benda kerja dari *innerside friction welding* ditunjukkan pada Gambar 2.4. Dengan model sambungan ini diharapkan dapat meningkatkan kekuatan sambungan dan mengurangi porositas yang terjadi pada material yang akan di las.



Gambar 2.4 Bentuk benda kerja *innerside friction welding*
(Sumber : Susilo, T. P., 2011)

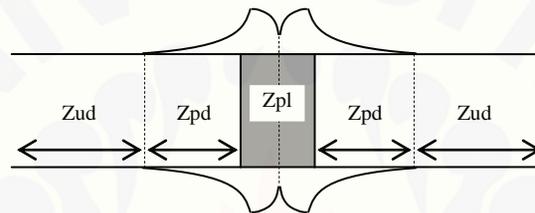
2.7 Kelebihan *Friction Welding*

Beberapa hal yang menjadi pertimbangan dalam pemilihan las gesek sebagai metode penyambungan antara lain:

1. Prosesnya meminimalisir energi yang dibutuhkan
2. Tidak menghasilkan asap dan geram
3. Dapat dilakukan pada logam yang berbeda jenis
4. Kekuatan sambungan sama/lebih dari logam induknya
5. Pengelasan pada temperatur rendah dapat mempertahankan mikrostruktur dan sifat material
6. Daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) yang sempit

Dalam sambungan las memiliki daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) yang berbeda dan dari luasan HAZ ini dapat diketahui seberapa besar pengaruh panas terhadap perubahan struktur material disekitar sambungan. Dalam penggunaan variasi

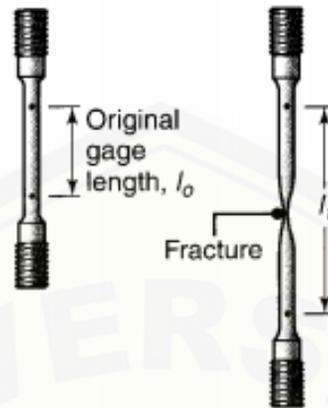
rotation speed (putaran spindel) yang berbeda akan menghasilkan panas yang berbeda, sehingga membentuk luasan daerah HAZ yang berbeda pula. Dalam sambungan las terbagi menjadi tiga bagian, yaitu *fully plasticized* (Zpl) atau daerah sambungan las dimana terjadi penyatuan kedua material secara sempurna, *partially deformed* (Zpd) atau daerah yang mengalami pengaruh panas sebagian yang sering disebut HAZ (*Heat Affected Zone*) dan *undeformed regions* (Zud) atau daerah yang tidak terpengaruh panas disajikan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Bagian sambungan las gesek

2.8 Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan metode yang paling umum digunakan untuk menentukan sifat mekanik dari suatu material seperti kekuatan, keuletan, ketangguhan, modulus elastisitas, dan kemampuan *strain-hardening*. Spesimen uji tarik ditunjukkan seperti pada Gambar 2.6. Bentuk yang umum digunakan untuk pengujian ini adalah bentuk silinder pejal, tetapi spesimen uji juga dapat berbentuk datar atau berbentuk tabung. Spesimen uji tarik umumnya disiapkan berdasarkan standar yang digunakan. Standar yang digunakan dapat menggunakan ASTM, JIS atau DIN tergantung kepada peneliti (Kalpakjian S., dkk, 2009).



Gambar 2.6 Spesimen uji tarik (Sumber: Kalpakjian, S., dkk., 2009)

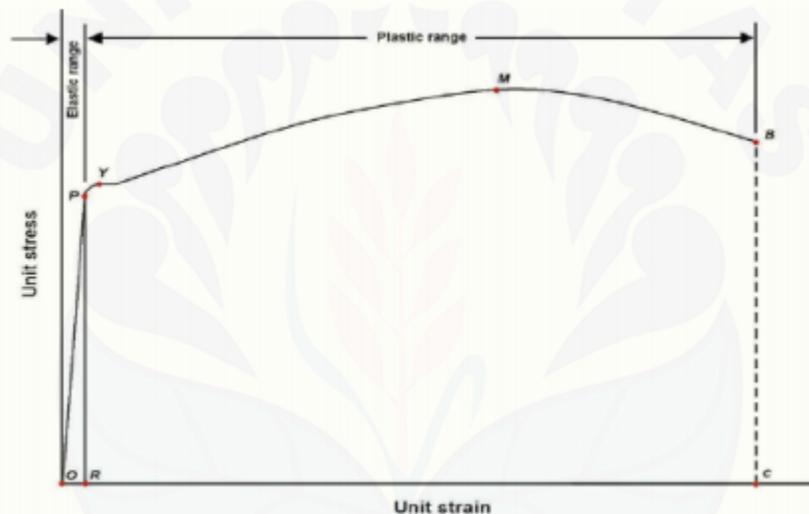
Djaprie, S., dkk., (2000), menjelaskan pada uji tarik kedua ujung benda dijepit kemudian salah satu ujung dihubungkan dengan perangkat pengukur beban dari mesin uji dan ujung lainnya dihubungkan ke perangkat peregang. Benda uji diberi beban gaya tarik sesumbu yang bertambah besar secara kontinu, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan mengenai perpanjangan yang dialami benda uji. Data yang didapat berupa perubahan panjang dan perubahan beban yang selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik tegangan-regangan, yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Data-data penting yang diharapkan didapat dari pengujian tarik ini adalah; perilaku mekanik material dan karakteristik perpatahan (Yuwono, H. A., 2009).

2.8.1 Perilaku Mekanik Material

Pengujian tarik yang dilakukan pada suatu material padatan (logam dan nonlogam) dapat memberikan keterangan yang relatif lengkap mengenai perilaku material tersebut terhadap pembebanan mekanis. Ada beberapa data yang dapat diperoleh antara lain:

a. Batas proporsionalitas (*proportionality limit*)

Merupakan daerah batas dimana tegangan dan regangan mempunyai hubungan proporsionalitas satu dengan lainnya. Setiap penambahan tegangan akan diikuti dengan penambahan regangan secara proporsional dalam hubungan linier $\sigma = E\varepsilon$ (bandingkan dengan hubungan $y = mx$; dimana y mewakili tegangan; x mewakili regangan dan m mewakili slope kemiringan dari modulus kekakuan). Titik P pada Gambar 2.7 di bawah ini menunjukkan batas proporsionalitas dari kurva tegangan-regangan.



Gambar 2.7 Kurva tegangan-regangan dari sebuah benda uji terbuat baja ulet
(Sumber: Yuwono, H. A., 2009)

b. Batas elastis (*elastic limit*)

Daerah elastis adalah daerah dimana bahan akan kembali kepada panjang semula bila tegangan luar dihilangkan. Daerah proporsionalitas merupakan bagian dari batas elastik ini. Selanjutnya bila bahan terus diberikan tegangan (deformasi dari luar) akan menyebabkan terjadinya deformasi permanen (plastis) pertama kalinya. Kebanyakan material teknik memiliki batas elastis yang hampir berimpitan dengan batas proporsionalitasnya.

c. Titik luluh (*yield point*) dan kekuatan luluh (*yield strength*)

Titik ini merupakan suatu batas dimana material akan terus mengalami deformasi tanpa adanya penambahan beban. Tegangan (*stress*) yang mengakibatkan bahan menunjukkan mekanisme luluh ini disebut tegangan luluh (*yield stress*). Titik luluh ditunjukkan oleh titik Y pada Gambar 2.7 di atas. Gejala luluh umumnya hanya ditunjukkan oleh logam-logam ulet dengan struktur Kristal BCC dan FCC yang membentuk *interstitial solid solution* dari atom-atom carbon, boron, hidrogen dan oksigen. Interaksi antara dislokasi dan atom-atom tersebut menyebabkan baja ulet seperti mild steel menunjukkan titik luluh bawah (*lower yield point*) dan titik luluh atas (*upper yield point*). Baja berkekuatan tinggi dan besi tuang yang getas umumnya tidak memperlihatkan batas luluh yang jelas.

Untuk menentukan kekuatan luluh material seperti ini maka digunakan suatu yang dikenal sebagai Metode *Offset*. Dengan metode ini kekuatan luluh (*yield strength*) ditentukan sebagai tegangan dimana bahan memperlihatkan batas penyimpangan/deviasi tertentu dari proporsionalitas tegangan dan regangan. Pada Gambar 2.8 di bawah ini garis *offset* OX ditarik paralel dengan OP, sehingga perpotongan XW dan kurva tegangan regangan memberikan titik Y sebagai kekuatan luluh. Umumnya garis *offset* OX diambil 0.1 – 0.2% dari regangan total dimulai dari titik O.



Gambar 2.8 Kurva tegangan-regangan dari sebuah benda uji terbuat dari bahan getas (Sumber: Yuwono, H. A., 2009)

Kekuatan luluh atau titik luluh merupakan suatu gambaran kemampuan bahan menahan deformasi permanen bila digunakan dalam penggunaan struktural yang melibatkan pembebanan mekanik seperti tarik, tekan bending atau puntiran. Di sisi lain, batas luluh ini harus dicapai ataupun dilewati bila bahan (logam) dipakai dalam proses manufaktur produk- produk logam seperti proses *rolling*, *drawing*, *stretching* dan sebagainya. Dapat dikatakan bahwa titik luluh adalah suatu tingkat tegangan yang:

- Tidak boleh dilewati dalam penggunaan struktural (*in service*)
- Harus dilewati dalam proses manufaktur logam (*forming process*)

d. Kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*)

Merupakan tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum terjadinya perpecahan (*fracture*). Nilai kekuatan tarik maksimum σ_{uts} ditentukan dari beban maksimum F_{maks} dibagi luas penampang awal A_0 .

$$UTS = \frac{F_{maks}}{A_0}$$

(2.1)

Pada bahan ulet tegangan maksimum ini ditunjukkan oleh titik M (Gambar 2.8) dan selanjutnya bahan akan terus berdeformasi hingga titik B. Bahan yang bersifat getas memberikan perilaku yang berbeda dimana tegangan maksimum sekaligus tegangan perputahan (titik B pada Gambar 2.8). Dalam kaitannya dengan penggunaan *structural* maupun dalam proses *forming* bahan, kekuatan maksimum adalah batas tegangan yang sama sekali tidak boleh dilewati.

e. Kekuatan Putus (*breaking strength*)

Kekuatan putus ditentukan dengan membagi beban pada saat benda uji putus ($F_{breaking}$) dengan luas penampang awal A_0 . Untuk bahan yang bersifat ulet pada saat beban maksimum M terlampaui dan bahan terus terdeformasi hingga titik putus B maka terjadi mekanisme (*necking*) sebagai akibat adanya suatu deformasi yang terlokalisasi. Pada bahan ulet kekuatan putus adalah lebih kecil daripada kekuatan maksimum sementara pada bahan getas kekuatan putus adalah sama dengan kekuatan maksimumnya.

f. Keuletan (*ductility*)

Keuletan merupakan suatu sifat yang menggambarkan kemampuan logam menahan deformasi hingga terjadinya perputahan. Sifat ini, dalam beberapa tingkatan harus dimiliki oleh bahan bila ingin dibentuk (*forming*) melalui proses *rolling*, *bending*, *stretching*, *drawing*, *hammering*, *cutting* dan sebagainya. Pengujian tarik memberikan dua metode pengukuran keuletan bahan yaitu:

- Persentase perpanjangan (*elongation*)

Diukur sebagai penambahan panjang ukur setelah perputahan terhadap panjang.

$$\text{Elongasi, } \varepsilon (\%) = [(L_f - L_0)/L_0] \times 100\% \quad (2.2)$$

dimana L_f adalah panjang akhir dan L_0 panjang awal dari benda uji.

g. Modulus elastisitas (E)

Modulus elastisitas atau modulus Young merupakan ukuran kekakuan suatu material. Semakin besar harga modulus ini maka semakin kecil regangan elastis yang terjadi pada suatu tingkat pembebanan tertentu, atau dapat dikatakan material tersebut semakin kaku (*stiff*). Pada grafik tegangan-regangan (Gambar 2.7 dan 2.8), modulus kekakuan tersebut dapat dihitung dari *slope* kemiringan garis elastis yang linier. diberikan oleh:

h. Modulus kelentingan (*modulus of resilience*)

Mewakili kemampuan material untuk menyerap energi dari luar tanpa terjadinya kerusakan. Nilai modulus dapat diperoleh dari luas segitiga yang dibentuk oleh area elastis diagram tegangan-regangan pada Gambar 2.7.

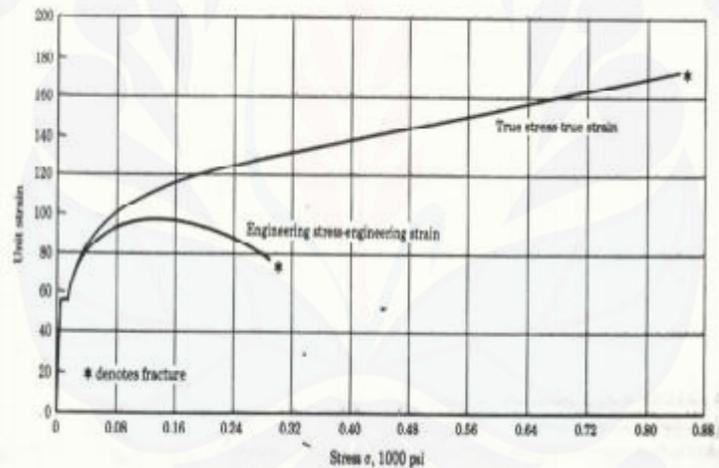
i. Modulus ketangguhan (*modulus of toughness*)

Merupakan kemampuan material dalam menyerap energi hingga terjadinya perpatahan. Secara kuantitatif dapat ditentukan dari luas area keseluruhan di bawah kurva tegangan-regangan hasil pengujian tarik seperti Gambar 2.7. Pertimbangan disain yang mengikut sertakan modulus ketangguhan menjadi sangat penting untuk komponen-komponen yang mungkin mengalami pembebanan berlebih secara tidak disengaja. Material dengan modulus ketangguhan yang tinggi akan mengalami distorsi yang besar karena pembebanan berlebih, tetapi hal ini tetap disukai dibandingkan material dengan modulus yang rendah dimana perpatahan akan terjadi tanpa suatu peringatan terlebih dahulu.

j. Kurva tegangan-regangan rekayasa dan sesungguhnya

Kurva tegangan-regangan rekayasa didasarkan atas dimensi awal (luas area dan panjang) dari benda uji, sementara untuk mendapatkan kurva tegangan-regangan sesungguhnya diperlukan luas area dan panjang aktual pada saat pembebanan setiap

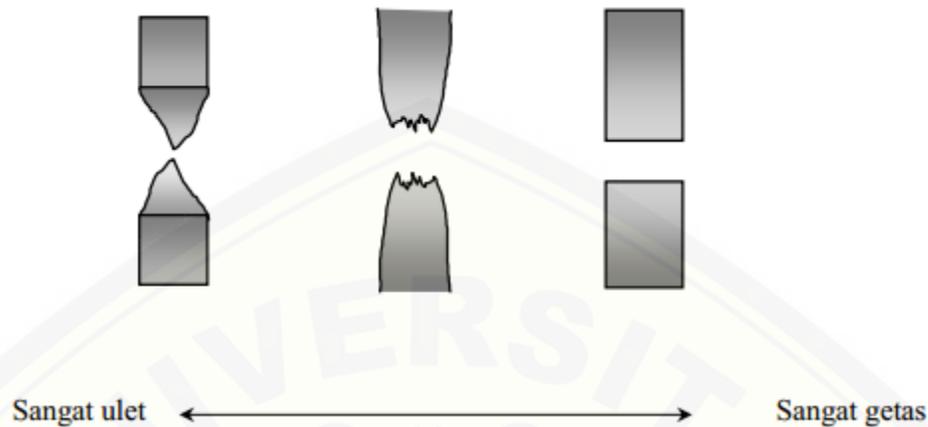
saat terukur. Perbedaan kedua kurva tidaklah terlalu besar pada regangan yang kecil, tetapi menjadi signifikan pada rentang terjadinya pengerasan regangan (*strain hardening*), yaitu setelah titik luluh terlampaui. Secara khusus perbedaan menjadi demikian besar di dalam daerah *necking*. Pada kurva tegangan-regangan rekayasa, dapat diketahui bahwa benda uji secara aktual mampu menahan turunnya beban karena luas area awal A_0 bernilai konstan pada saat penghitungan tegangan $\sigma = P/A_0$. Sementara pada kurva tegangan-regangan sesungguhnya luas area actual adalah selalu turun hingga terjadinya perpatahan dan benda uji mampu menahan peningkatan tegangan karena $\sigma = P/A$. Gambar 2.9 di bawah ini memperlihatkan contoh kedua kurva tegangan-regangan tersebut pada baja karbon rendah (*mild steel*).



Gambar 2.9 Perbandingan antara kurva tegangan-regangan rekayasa dan sesungguhnya dari baja karbon rendah (*mild steel*)

2.8.2. Mode Perpatahan Material

Sampel hasil pengujian tarik dapat menunjukkan beberapa tampilan perpatahan seperti diilustrasikan oleh Gambar 2.10 di bawah ini:



Gambar 2.10 Ilustrasi penampang samping bentuk perpatahan benda uji tarik sesuai dengan tingkat keuletan/kegetasan

Perpatahan ulet memberikan karakteristik berserabut (*fibrous*) dan gelap (*dull*), sementara perpatahan getas ditandai dengan permukaan patahan yang berbutir (*granular*) dan terang. Perpatahan ulet umumnya lebih disukai karena bahan ulet umumnya lebih tangguh dan memberikan peringatan lebih dahulu sebelum terjadinya kerusakan.

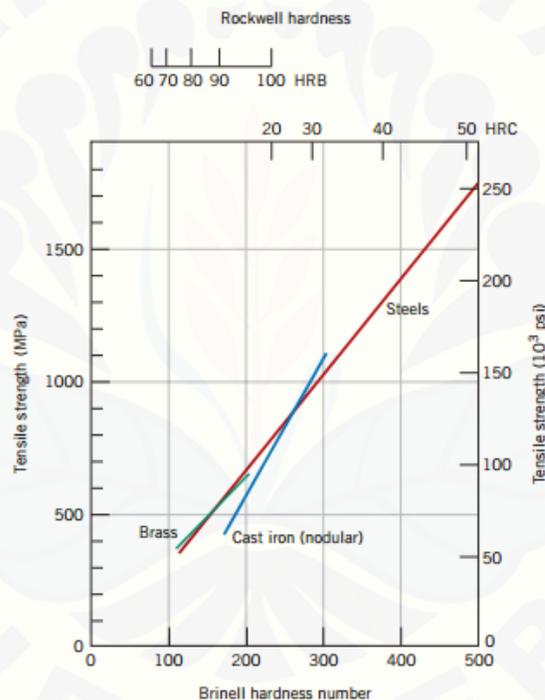
Pengamatan kedua tampilan perpatahan itu dapat dilakukan baik dengan mata telanjang maupun dengan bantuan *stereoscan microscope*. Pengamatan lebih detail dimungkinkan dengan penggunaan SEM (*Scanning Electron Microscope*).

2.9 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan adalah satu dari sekian banyak pengujian yang dipakai, karena dapat dilaksanakan pada benda uji yang kecil tanpa kesukaran mengenai spesifikasi. Dalam pengujian kekerasan, seperti pada pengujian statik lainnya diukur ketahanan terhadap deformasi (Surdia, T., dkk., 2000). Kekerasan dapat dihubungkan dengan kekuatan luluh atau kekuatan tarik logam, karena sewaktu indentasi, material di sekitar jejak mengalami deformasi plastis mencapai beberapa persen regangan tertentu (Djaprie, S., dkk., 2000).

Pengujian kekerasan ini memiliki beberapa keuntungan antara lain:

1. Pengujian ini mudah dilakukan dan relatif murah, karena spesimen yang diuji tidak memerlukan persiapan khusus dan peralatan yang digunakan relatif murah.
2. Pengujiannya tidak merusak, karena spesimen yang di uji tidak mengalami perubahan bentuk yang ekstrim atau patah; satu-satunya deformasi yang terjadi adalah indentasi yang kecil.
3. Sifat mekanik yang lain dapat diperkirakan dari data kekerasan seperti kekuatan tarik (Callister, W. D., 2007) disajikan pada gambar gambar 2.11.



Gambar 2.11 Hubungan antara kekerasan dan kekuatan tarik pada besi cor, tembaga dan baja. (Sumber: Callister, W. D., 2007)

Pada prinsipnya pengujian kekerasan ini mempunyai tiga metode yaitu penggoresan (*scratching*), pantulan ataupun indentasi dari material keras terhadap suatu permukaan benda uji. Berdasarkan mekanisme penekanan tersebut, dikenal 3

metode uji kekerasan yaitu metode gores, metode elastik/pantul (*rebound*), dan metode indentasi (Yuwono, H. A., 2009).

2.9.1 Metode indentasi

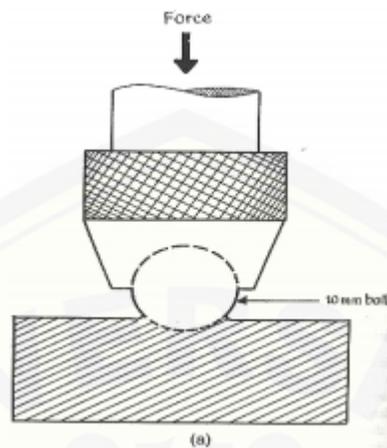
Pengujian dengan metode ini dilakukan dengan penekanan benda uji dengan indenter dengan gaya tekan dan waktu indentasi yang ditentukan. Kekerasan suatu material ditentukan oleh dalam ataupun luas area indentasi yang dihasilkan (tergantung jenis indenter dan jenis pengujian). Berdasarkan prinsip bekerjanya metode uji kekerasan dengan cara indentasi ada tiga metode yaitu metode Brinell, metode Vickers, dan metode Rockwell. Pengujian yang paling sering digunakan untuk meneliti suatu kekerasan suatu material adalah metode Brinell (Yuwono, H. A., 2009).

2.9.2 Metode Brinell

Metode ini diperkenalkan pertama kali oleh J.A. Brinell pada tahun 1900. Pengujian kekerasan dilakukan dengan memakai bola baja yang diperkeras (*hardened steel ball*) dengan beban dan waktu indentasi tertentu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.12. Hasil penekanan adalah jejak berbentuk lingkaran bulat, yang harus dihitung diameternya di bawah mikroskop khusus pengukur jejak. Contoh pengukuran hasil penjejakan disajikan pada Gambar 2.12. Pengukuran nilai kekerasan suatu material diberikan oleh rumus:

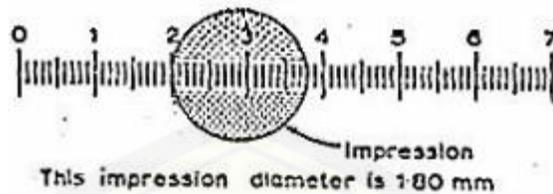
$$BHN = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.3)$$

dimana P adalah beban (kg), D adalah diameter indenter (mm) dan d adalah diameter jejak (mm).



Gambar 2.12 Skematis prinsip indentasi dengan metode Brinell
(Sumber : Yuwono, H. A., 2009)

Prosedur standar pengujian mensyaratkan bola baja dengan diameter 10 mm dan beban 3000 kg untuk pengujian logam-logam ferrous, atau 500 kg untuk logam-logam non-ferrous. Untuk logam-logam ferrous, waktu indentasi biasanya sekitar 10 detik sementara untuk logam-logam non-ferrous sekitar 30 detik. Walaupun demikian pengaturan beban dan waktu indentasi untuk setiap material dapat pula ditentukan oleh karakteristik alat penguji. Nilai kekerasan suatu material yang dinotasikan dengan 'HB' tanpa tambahan angka di belakangnya menyatakan kondisi pengujian standar dengan indenter bola baja 10 mm, beban 3000 kg selama waktu 1-15 detik. Untuk kondisi yang lain, nilai kekerasan HB diikuti angka-angka yang menyatakan kondisi pengujian. Contoh: 75 HB 10/500/30 menyatakan nilai kekerasan Brinell sebesar 75 dihasilkan oleh suatu pengujian dengan indenter 10 mm, pembebanan 500 kg selama 30 detik.



Gambar 2.13 Hasil indentasi Brinell berupa jejak berbentuk lingkaran dengan ukuran diameter dalam skala mm.

(Sumber : Yuwono, H. A., 2009)

2.10 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi ini dilakukan untuk menganalisa struktur mikro pada sampel. Adapun prinsip dasar langkah-langkah untuk melakukan pengujian ini adalah sebagai berikut:

2.10.1 *Cutting* (Pemotongan)

Pemilihan sampel yang tepat dari suatu benda uji studi mikroskopik merupakan hal yang sangat penting. Pemilihan sampel tersebut didasarkan pada tujuan pengamatan yang hendak dilakukan. Pada umumnya bahan komersil tidak homogen, sehingga satu sampel yang diambil dari suatu volume besar tidak dapat dianggap representatif. Pengambilan sampel harus direncanakan sedemikian sehingga menghasilkan sampel yang sesuai dengan kondisi rata-rata bahan atau kondisi di tempat-tempat tertentu (kritis), dengan memperhatikan kemudahan pemotongan sampel tersebut. Secara garis besar, pengambilan sampel dilakukan pada daerah yang akan diamati mikrostruktur maupun makrostrukturnya. Sebagai contoh, untuk pengamatan mikrostruktur material yang mengalami kegagalan, maka sampel diambil sedekat mungkin pada daerah kegagalan (pada daerah kritis dengan kondisi terparah), untuk kemudian dibandingkan dengan sampel yang diambil dari daerah yang jauh dari daerah gagal. Perlu diperhatikan juga bahwa dalam proses memotong, harus dicegah kemungkinan deformasi dan panas yang berlebihan. Oleh karena itu, setiap proses pemotongan harus diberi pendinginan yang memadai.

Ada beberapa sistem pemotongan sampel berdasarkan media pemotong yang digunakan, yaitu meliputi proses pematahan, pengguntingan, penggergajian, pemotongan abrasi (*abrasive cutter*), gergaji kawat, EDM (*Electric Discharge Machining*). Berdasarkan tingkat deformasi yang dihasilkan, teknik pemotongan terbagi menjadi menjadi dua, yaitu :

1. Teknik pemotongan dengan deformasi yang besar, menggunakan gerinda.
2. Teknik pemotongan dengan deformasi kecil, menggunakan *low speed diamond saw*.

2.10.2 Mounting

Spesimen yang berukuran kecil atau memiliki bentuk yang tidak beraturan akan sulit untuk ditangani khususnya ketika dilakukan pengamplasan dan pemolesan akhir. Sebagai contoh adalah spesimen yang berupa kawat, spesimen lembaran metal tipis, potongan yang tipis, dll. Untuk memudahkan penanganannya, spesimen-spesimen tersebut harus ditempatkan pada suatu media (*media mounting*). Secara umum syarat-syarat yang harus dimiliki bahan *mounting* adalah:

1. Bersifat inert (tidak bereaksi dengan material maupun zat etsa).
2. Sifat eksoterimis rendah.
3. Viskositas rendah.
4. Penyusutan linier rendah.
5. Sifat adhesi baik.
6. Memiliki kekerasan yang sama dengan sampel.
7. *Flowabilitas* baik, dapat menembus pori, celah dan bentuk ketidakteraturan yang tedapat pada sampel.
8. Khusus untuk etsa elektrolitik dan pengujian SEM, bahan *mounting* harus konduusif.

Media *mounting* yang dipilih haruslah sesuai dengan material dan jenis reagen etsa yang akan digunakan. Pada umumnya *mounting* menggunakan material plastik sintetik. Materialnya dapat resin (*castable resin*) yang dicampur dengan *hardener* atau bakelit. Penggunaan *castable resin* lebih mudah dan alat yang digunakan lebih sederhana dibandingkan bakelit, karena tidak memiliki sifat mekanis yang baik (lunak) sehingga kurang cocok untuk material-material keras. Teknik *mounting* yang paling baik adalah menggunakan *thermosetting* resin dengan menggunakan material bakelit. Material ini berupa bubuk yang tersedia dengan warna beragam. *Thermosetting mounting* membutuhkan alat khusus, karena dibutuhkan aplikasi tekanan 4200 lb/in^2 dan panas 149° pada *mold* saat *mounting*.

2.10.3 *Grinding* (pengamplasan)

Sampel yang baru saja dipotong atau sampel yang telah terkorosi memiliki permukaan yang kasar. Permukaan yang kasar ini harus diratakan agar pengamatan struktur mudah untuk dilakukan. Pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas silikon karbit (SiC) dengan berbagai tingkat kekasaran yang ukuran butir abrasifnya dinyatakan dengan mesh, yaitu kombinasi dari 220, 330, 500, 600, 800, dan 1000. Ukuran grid pertama yang dipakai tergantung pada kekasaran permukaan dan kedalaman kerusakan yang ditimbulkan oleh pemotongan. Seperti perubahan struktur akibat panas yang timbul pada saat proses pemotongan dan perubahan bentuk sampel akibat beban alat potong.

Hal yang perlu diperhatikan pada saat pengamplasan adalah pemberian air. Air berfungsi sebagai pemindah beram, memperkecil kerusakan akibat panas yang timbul yang dapat merubah struktur mikro sampel dan memperpanjang masa pemakaian kertas amplas. Hal lain yang harus diperhatikan adalah ketika melakukan perubahan arah pengamplasan, maka arah yang baru adalah 45° atau 90° terhadap arah sebelumnya.

2.10.4 *Polishing* (pemolesan)

Setelah diampelas sampai halus, sampel harus dilakukan pemolesan. Pemolesan bertujuan untuk memperoleh permukaan sampel yang halus bebas goresan dan mengkilap seperti cermin dan menghilangkan ketidakteraturan sampel hingga orde $0,01 \mu\text{m}$. Permukaan sampel yang akan diamati di bawah mikroskop harus benar-benar rata. Apabila permukaan sampel kasar atau bergelombang, maka pengamatan struktur mikro akan sulit untuk dilakukan karena cahaya yang datang dari mikroskop dipantulkan secara acak oleh permukaan sampel.

Tahap pemolesan dimulai dengan kasar terlebih dahulu kemudian dilanjutkan dengan pemolesan halus. Ada 3 metode pemolesan antara lain yaitu sebagai berikut :

a. Pemolesan Elektrolit Kimia

Hubungan rapat arus dan tegangan bervariasi untuk larutan elektrolit dan material yang berbeda dimana untuk tegangan, berbentuk lapisan tipis pada permukaan dan hampir tidak ada arus yang lewat, maka terjadi proses etsa. Sedangkan pada tegangan tinggi terjadi pemolesan.

b. Pemolesan Kimia Mekanis

Merupakan kombinasi antara etsa kimia dan pemolesan mekanis yang dilakukan serentak di atas pinggiran halus. Partikel pemoles abrasif dicampur dengan larutan pengetsa yang umum digunakan.

c. Pemolesan Elektro Mekanis (Metode *Reinacher*)

Merupakan kombinasi antara pemolesan elektrolit dan mekanis pada piring pemoles. Metode ini sangat baik untuk logam mulia, tembaga, kuningan dan perunggu.

2.10.5 *Etching* (Etsa)

Etsa merupakan proses penyerangan atau pengikisan batas butir secara selektif dan terkendali dengan pencelupan ke dalam larutan pengetsa baik menggunakan listrik maupun tidak ke permukaan sampel sehingga detail struktur yang akan diamati

akan terlihat dengan jelas dan tajam. Untuk beberapa material, mikrostruktur baru muncul jika diberi zat etsa. Sehingga perlu pengetahuan yang tepat untuk memilih zat etsa yang tepat.

a. Etsa Kimia

Merupakan proses penetsaan dengan menggunakan larutan kimia dimana zat etsa yang digunakan ini memiliki karakteristik tersendiri sehingga pemilihannya disesuaikan dengan sampel yang akan diamati. Contohnya seperti : nitrid acid / natal (asam nitrat + alcohol 95%), picral (asam picric + alcohol), ferric chloride, hydrofluoric acid, dan lain-lain. Waktu etsa yang dibutuhkan tidak terlalu lama (umumnya sekitar 4 – 30 detik), dan setelah dietsa segera dicuci dengan air mengalir lalu dengan alkohol kemudian dikeringkan dengan alat pengering.

b. Elektro Etsa (Etsa Elektrolitik)

Merupakan proses etsa dengan menggunakan reaksi elektroetsa. Cara ini dilakukan dengan pengaturan tegangan dan kuat arus listrik serta waktu peetsaan. Etsa jenis ini biasanya khusus untuk stainless steel karena dengan etsa kimia susah untuk mendapatkan detil strukturnya.

2.11 Hipotesis

Metode *innerside friction welding* akan memperluas bidang kontak permukaan lasan, sehingga akan mempengaruhi kekuatan tarik pada hasil sambungan. Dengan penggunaan putaran spindel yang semakin besar sehingga kekuatan tarik dan kekerasan semakin meningkat. Sedangkan penambahan sudut *chamfer* akan mengurangi porositas hasil pengelasan karena volume udara yang terjebak akan berkurang.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental. Eksperimental adalah suatu observasi dibawah kondisi buatan, dimana kondisi tersebut sengaja dibuat dan diatur oleh peneliti. Dengan demikian penelitian eksperimental ialah penelitian yang dilakukan dengan memanipulasi terhadap objek penelitian serta adanya kontrol.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dimulai pada bulan September 2015 sampai selesai. Penelitian ini meliputi dua kegiatan utama yaitu pengelasan dan pengujian. Untuk pengelasan dilakukan di Laboratorium Kerja Logam dan pengujian sifat mekanik dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember Laboratorium. Pengamatan mikro dilakukan di Laboratorium Uji Bahan Teknik Mesin ITN Malang.

3.3 Bahan dan Alat Penelitian

3.3.1 Bahan

1. Poros Aluminium seri 6061 dengan diameter 19 mm (*solid round*) dan kedua ujung benda kerja dibentuk *innerside*.
2. Bahan Etsa

Bahan Etsa digunakan untuk membuat struktur permukaan benda tampak jelas. Mengetsas adalah merusak permukaan benda uji dengan cairan tertentu yang sesuai, sehingga strukturnya terlihat dengan jelas.

3. Resin dan *Hardener*

Resin dan *Hardener* adalah bahan kimia yang digunakan untuk membuat pegangan pada benda uji waktu pengujian kekerasan dan metalografi.

4. Pasta poles

Pasta poles digunakan untuk menggosok permukaan benda uji sebelum dilakukan penelitian agar permukaan menjadi bersih. Pasta poles yang digunakan adalah Autosol.

3.3.2 Alat

Adapun peralatan yang digunakan dalam pengujian ini sebagai berikut:

1. Mesin Bubut (kepala lepas dimodifikasi)
2. Amplas
3. Gergaji
4. Jangka sorong
5. Gerinda
6. *Stopwatch*
7. Alat ukur tekanan gesek dan tempa
8. Alat Uji Tarik
9. Alat Uji Kekerasan
10. Alat Uji Struktur mikro

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sebelum dilakukan penelitian. Variabel bebas yang digunakan adalah putaran spindel dengan variasi putaran spindel 600 rpm, 800 rpm, 1000 rpm dan sudut *chamfer* dengan variasi sudut 0° dan 30°.

3.4.2 Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besar nilainya tergantung oleh variabel bebas. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel terikat adalah kekuatan tarik, kekerasan, porositas, dan struktur mikro.

3.4.3 Variabel kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang besarnya dikendalikan selama penelitian. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel kontrol adalah:

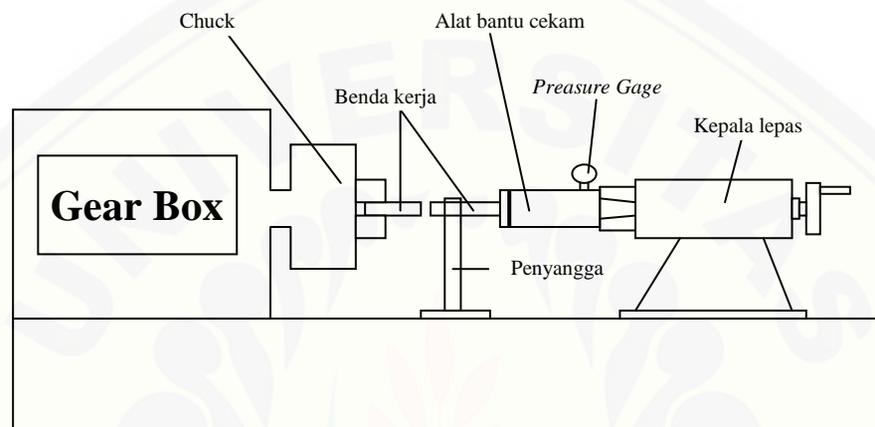
1. Tekanan pengelasan 30 kg/cm^2
2. Tekanan akhir 75 kg/cm^2
3. Waktu *preheating* 45 detik
4. Waktu pengelasan (*friction time*) 60 detik
5. *Holding time* 30 detik

3.5 Proses Pengelasan

Berikut ini adalah langkah-langkah dalam proses *Friction Welding* :

1. Spesimen terlebih dahulu dibubut pada permukaan yang akan digesek, kemudian dibersihkan dari kotoran dan minyak.
2. Ujung spesimen sisi pertama dibentuk dengan *menchamfer* bagian depan benda dan sisi yang lainnya *menchamfer* bagian dalam benda
3. Membuat *chamfer* dengan sudut 30° pada beberapa spesimen yang akan disambung.
4. Spesimen dicekam pada alat pencekam yang terpasang pada kepala lepas dan *rotating chuck* kemudian diberi tekanan gesek sebesar 30 kg/cm^2 .
5. Mesin dinyalakan dengan putaran 600 rpm, 800 rpm, dan 1000 rpm.
6. Menghitung waktu gesekan untuk *preheating* selama 45 detik, kemudian dilanjutkan menghitung waktu gesekan selama 60 detik

7. Setelah waktu terpenuhi maka mesin dimatikan dan dilakukan pengereman agar putaran mengalami perlambatan.
8. Kemudian spesimen ditekan sebesar 75 kg/cm^2 dan ditahan selama 30 detik.
9. Spesimen dilepas dari mesin dan dibersihkan.



Gambar 3.1 Skema alat *Friction Welding*

3.6 Proses Pengujian

3.6.1 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan pada spesimen hasil pengelasan. Spesimen yang digunakan untuk uji tarik dibuat menurut standar ASTM E8/E8M – 09 (*Annual Book of Astm Standards*).

Dari pengujian tarik ini didapat grafik tegangan vs regangan. Tegangan (σ) didapat dengan menggunakan rumus :

$$\sigma = \frac{F'}{A_0}$$

F' : beban yang diberikan (N)

A_0 : luas penampang bahan sebelum dibebani (mm^2)

Sedangkan regangan (ε) didapat dengan menggunakan rumus :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} \times 100\%$$

ε : persentase perpanjangan atau keuletan (%)

L_i : panjang akhir (mm)

L_0 : panjang awal (mm)

ΔL : selisih batang uji (mm)

3.6.2 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan ini menggunakan metode brinell menggunakan acuan ASTM E 10 – 01. Spesimen uji untuk uji kekerasan ini harus mempunyai permukaan yang rata dan halus agar pada pengujian bisa dengan dengan mudah untuk diidentifikasi. Beban penekanan indenter yang diberikan dengan gaya 1 kg. Pada uji kekerasan ini menggunakan alat *Electric Brinell Hardness Tester* Hauser Henry S A. dengan menggunakan indenter bola baja berbentuk bulat. Berikut ini adalah langkah – langkah dalam melakukan pengujian kekerasan :

- a. Persiapan spesimen uji kekerasan dengan memotong benda kerja setelah dilakukan pengelasan dengan dimensi sesuai ASTM E 10 - 01.
- b. Spesimen *digrinding* dengan menggunakan amplas dengan grid 80-2000 pada mesin *grinding-polishing* hingga rata halus.
- c. Penentuan titik indentasi pada daerah sambungan (*base metal*, HAZ, dan *weld metal*).

3.6.3 Pengamatan Struktur Mikro

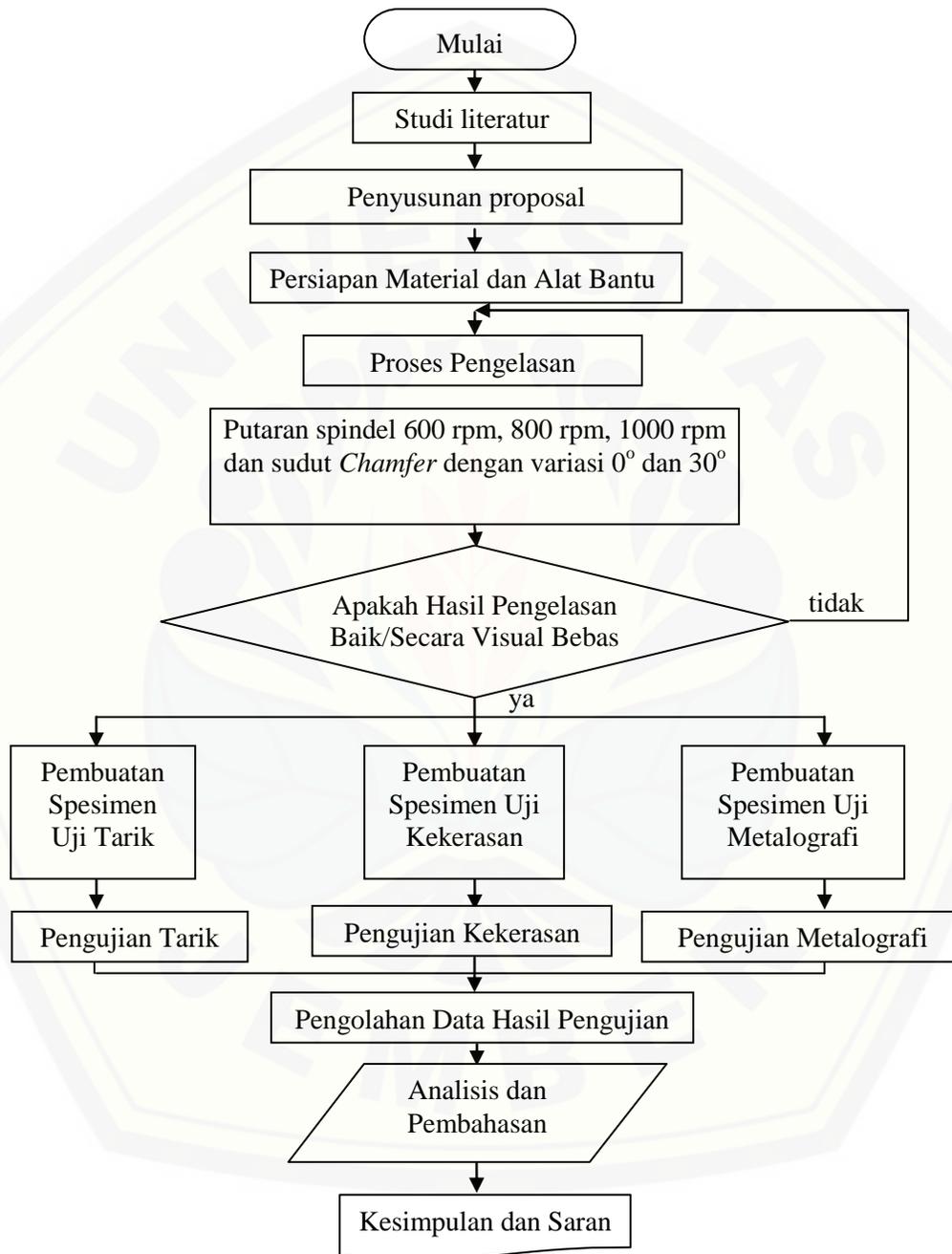
Setelah dilakukan proses *friction welding* untuk menganalisa struktur mikro yang terbentuk diperlukan pengamatan mikro atau pengujian metalografi. Persiapan spesimen uji metalografi sebagai berikut.

1. Persiapan spesimen uji sesuai standar ASTM E 3 – 95.
2. Pembuatan pemegang spesimen uji dengan bahan resin Polyester pada cetakan dengan perbandingan 50 gram resin. Polyester dicampur 3 ml larutan katalis pengeras, didiamkan selama ± 48 jam.
3. Penghalusan permukaan spesimen uji menggunakan amplas dengan grit 80 – 2000 pada mesin *grinding-polishing*.
4. Pengetsaan dilakukan dengan pemberian larutan NHO_3 , HCl, dan HF sesuai standar ASTM E 340 – 00 yang bertujuan untuk mengekstraksikan fasa yang terjadi.
5. Pengeringan spesimen dengan menggunakan *hair dryer*.
6. Spesimen diamati struktur mikro pada daerah *weld metal*, HAZ, dan *base metal* yang terjadi dengan mikroskop optis dengan perbesaran 100X.

3.7 Teknik Penyajian Data

Penyajian data dalam penelitian ini dilakukan dengan memasukkan data yang diperoleh dari penelitian dalam lembar pengamatan. Berupa data pengujian tarik, pengujian kekerasan dan pengamatan struktur mikro.

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian proses pengelasan dengan metode *friction welding* yang telah dilakukan pada material Aluminium paduan 6061 dengan variasi putaran spindel dan sudut *chamfer* dapat disimpulkan bahwa:

1. Putaran spindel dan sudut *chamfer* berpengaruh terhadap kekuatan tarik hasil sambungan pengelasan *friction welding* pada Aluminium 6061. Hasil pengujian tarik tertinggi diperoleh dari variasi 1000 rpm dengan sudut *chamfer* 30⁰ dengan nilai sebesar 111.45 N/mm². Sementara hasil pengujian tarik terendah diperoleh dari variasi 600 rpm dengan sudut *chamfer* 0⁰ sebesar 25.95 N/mm². Semakin besar putaran spindel, panas yang dihasilkan lebih tinggi. Sehingga kekuatan tarik meningkat seiring semakin tingginya putaran spindel.
2. Putaran spindel dan sudut *chamfer* berpengaruh terhadap kekerasan hasil sambungan las gesek pada Aluminium 6061. Hasil pengujian kekerasan tertinggi diperoleh dari variasi 1000 rpm dengan sudut *chamfer* 30⁰ dengan nilai masing-masing *zud* 104 BHN, *zpd* 125 BHN dan *zpl* 107 BHN. Secara keseluruhan sifat mekanis yang paling baik dari hasil penelitian pengelasan Aluminium 6061 dengan metode *friction welding* terjadi pada variasi 1000 rpm dan sudut *chamfer* 30⁰. Semakin besar putaran spindel, panas yang dihasilkan lebih tinggi. Sehingga ukuran butir didaerah lasan semakin kecil. Hal ini mengakibatkan kekerasan semakin meningkat seiring semakin tingginya putaran spindel.
3. Pada struktur mikro hasil sambungan las gesek pada Aluminium 6061 untuk variasi putaran spindel 600 rpm, 800 rpm, dan 1000 rpm dengan sudut *chamfer* 0⁰ menunjukkan cacat las yang semakin besar. Hal ini menandakan bahwa semakin kecil sudut *chamfer* maka cacat las semakin besar.

5.2 Saran

Saran yang dapat diajukan agar percobaan berikutnya dapat lebih baik dan dapat menyempurnakan percobaan yang telah dilakukan dalam penelitian ini adalah:

1. Perlu adanya pengembangan penelitian lanjutan untuk metode lain dari aspek material, termodinamika, desain dan manufaktur.
2. Perlu dilakukan pengujian-pengujian lain seperti pengamatan SEM/TEM, uji *impact*, uji *bending*, uji XRD, dll.
3. Disarankan menggunakan mesin kerja dan alat bantu dengan kemampuan yang lebih tinggi agar mampu mencapai hasil yang lebih maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Amstead, B.H., Phillip F., Myron L.B. dan Sriati D., 1989. *Teknologi Mekanik*. PT. Gelora Aksara Pratama.
- Anggara, Fendi. Skripsi. 2012. “Analisis Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Aluminium Paduan Al-Mg-Si Hasil Pengelasan *Linier Friction Welding* dengan Variasi *Rotation Speed*”. Tidak diterbitkan. Jember : Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.
- ASM International. 1994. *Fundamentals of Friction Welding, ASM Handbook, Welding, Brazing and Soldering, (vol. 6)*
- Astrom, Peter. 2001. *The Effect of Convective Heat Transfer Coefficient on the Residual Stresses after Cooling from Solution Heat Treatment*. Division of Computer Aided Design. Lulea University of Technology.
- Callister. William D. 2007. *Materials Science and Engineering*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Darsin, Mahros, et. al. 2013. *Mechanical Properties and Micro Structure of Aluminum Alloys [Al-Mg-Si] as Results of Variation Time in Friction Welding*. International Symposium on Mechanical and Maritime Engineering 2013.
- Djaprie, Sriati. Dieter, George E. 1996 *Metalurgi Mekanik*. Erlangga . Jakarta.
- Djaprie, Sriati. Smallman, R. E. Bishop R. J. 2000. *Metalurgi Fisik Modern Dan Rekayasa Material*. Erlangga . Jakarta.
- Fauzi, M. N. A., et. al. 2010. *Microstructure And Mechanical Properties Of Alumina-6061 Aluminum Alloy Joined By Friction Welding*. *Materials and Design* 31 (2010) 670–676.

Ferry, A. A. 2015. Kekuatan Puntir Sambungan Las Gesek Al-Mg-Si dengan Variasi Sudut *Chamfer* Dua Sisi dan Kekerasan.

Heine, Richard W. 1985. *Principles of Metal Casting*. New Delhi: Tata McGraw-Hill, Publishing Company Ltd.

Kalpakjian, Serope., Schmid, Steven R. 2009. *Manufacturing Engineering And Technology*. London : Prentice Hall.

Santoso, E. B, Irawan, Y. S dan Sutikno, S 2012. Pengaruh Sudut Chamfer Dan Gaya Tekan Akhir Terhadap Kekuatan Tarik dan Porositas Sambungan Las Gesek pada Paduan Al-Mg-Si. Malang: Jurnal Rekayasa Mesin. Vol.03.01 pp 293-298.

Surdia, T. dan Saito, S. 1995. Pengetahuan Bahan Teknik, Jakarta, : Pradnya Paramita.

Susilo, Toto Prakito. 2011. Pengaruh Sudut *Chamfer* dan *Upset Loading* Terhadap Kekuatan Puntir Sambungan *Innerside Friction Welding* pada *Transmission Shaft* Motor Listrik.

Tiwan. 2005. Penyambungan Baja AISI 1040 Batang Silinder Pejal dengan *Friction Welding*.

Wiryo Sumarto Harsono & Okumura Toshie. 2000. *Teknik Pengelasan Logam*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.

Yoedhawan, A. J. P. dan Sumarji. 2014. Analisis Kekerasan, Cacat Las, Dan Struktur Mikro Pada Sambungan T Paduan Aluminium 6061 T6511 Hasil Gas Metal Arc Welding (GMAW) Dengan Variasi Kuat Arus. Jurnal ROTOR, Volume 7 Nomor 2.

Yuwono, Herman A. 2009. Buku Panduan Praktikum Karakterisasi Material 1 pengujian Merusak (*Destructive Testing*). Depok : Departemen Metalurgi Dan Material Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

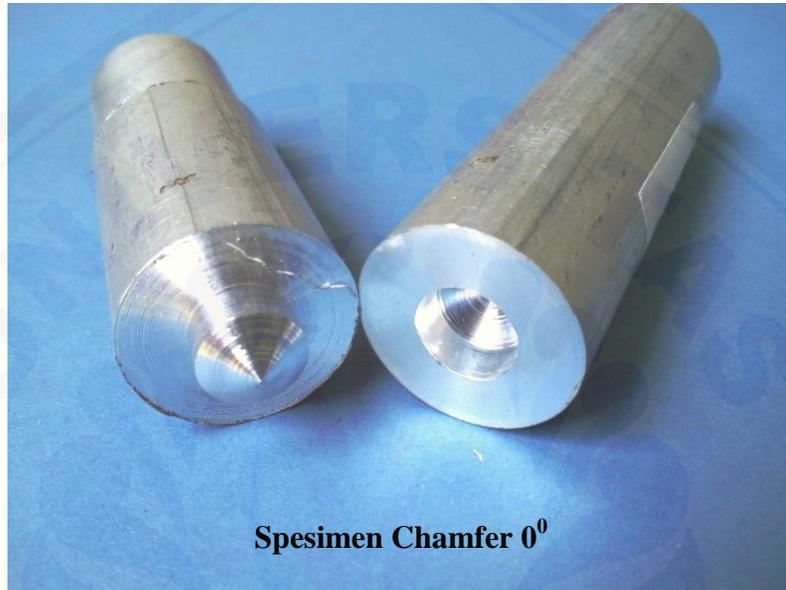
www.m-osaka.com (diakses pada tanggal 2 juli 2015).

www.gatwicktechnologies.com (diakses pada tanggal 8 juli 2015).

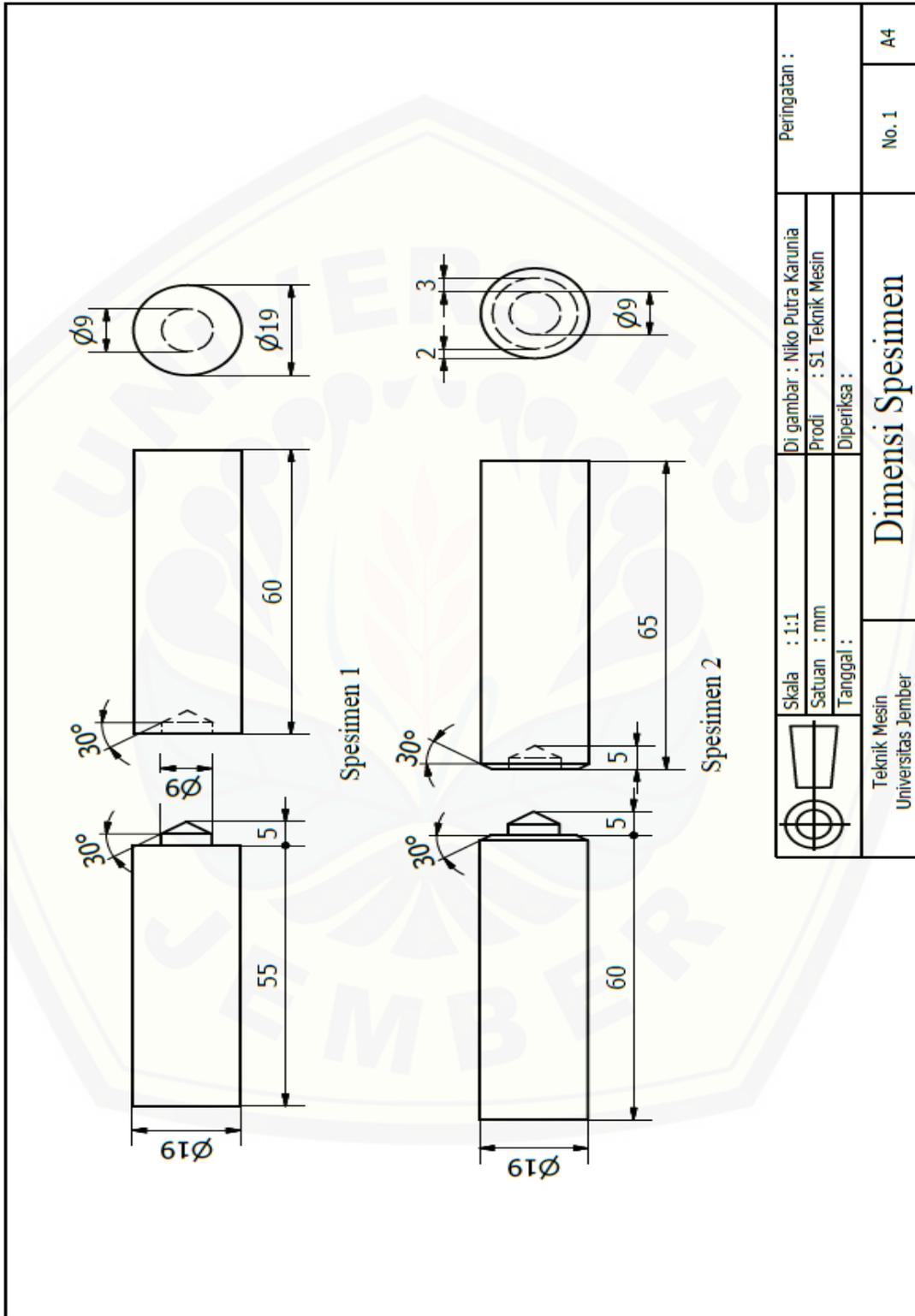


LAMPIRAN

A. Spesimen Al 6061 sebelum dilakukan proses pengelasan







B. Proses pengelasan *friction welding*



C. Hasil pengelasan *friction welding* Al 6061



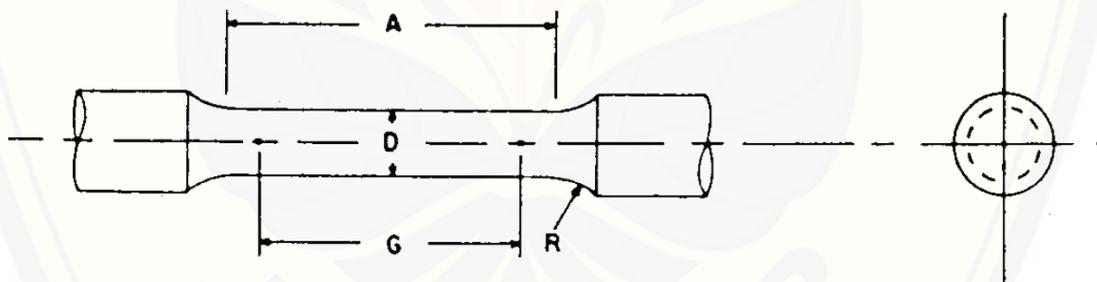




D. Spesimen yang sudah siap dilakukan uji tarik



Dimensi spesimen sesuai ASTM E8/ E8M



G —Gage length	24.0 ± 0.1
D —Diameter (Note 1)	$[1.000 \pm 0.005]$ 6.0 ± 0.1 $[0.250 \pm 0.005]$
R —Radius of fillet, min	$6 [0.188]$
A —Length of reduced section, min (Note 2)	$30 [1.25]$

E. Spesimen yang sudah siap dilakukan uji mikro dan kekerasan



F. Pengujian tarik



Saat melakukan pengujian tarik di Laboratorium Material Teknik Mesin, Universitas Jember

G. Pengujian kekerasan



Saat melakukan pengujian kekerasan di Laboratorium Material Teknik Mesin, Universitas Jember

H. Pengujian struktur mikro



I. Data hasil uji tarik

Sudut Chamfer	Putaran Spindel (Rpm)	L_0 (mm)	ΔL (mm)	F (N)	A (mm ²)	
0°	600	45	2.50	1540	63.585	
		45	2.87	1660	63.585	
		45	2.49	1750	63.585	
	800	45	4.19	2900	63.585	
		45	4.39	3190	63.585	
		45	6.66	3230	63.585	
	1000	45	5.55	6070	63.585	
		45	8.18	5000	63.585	
		45	8.01	4940	63.585	
	30°	600	45	3.97	1490	63.585
			45	5.41	1670	63.585
			45	5.65	2370	63.585
800		45	5.60	3500	63.585	
		45	5.57	4790	63.585	
		45	5.84	4510	63.585	
1000		45	13.23	6550	63.585	
		45	9.03	7400	63.585	
		45	9.17	7310	63.585	

J. Perhitungan pengujian tarik

Sudut Chamfer	Putaran Spindel (Rpm)	L_0 (mm)	ΔL (mm)	F (N)	A_0 (mm ²)	$\sigma = F/A_0$ (N/mm ²)	$\varepsilon = \Delta L/L_0 \times 100$ (%)
0	600	45	2.62	1650.00	63.59	25.95	5.8
	800	45	5.08	3106.67	63.59	48.86	11.3
	1000	45	7.25	5336.67	63.59	83.93	16.1
30	600	45	5.01	1843.33	63.59	28.99	11.1
	800	45	5.67	4266.67	63.59	67.10	12.6
	1000	45	10.48	7086.67	63.59	111.45	23.3
AL 6061		45	10.46	18460	63.59	290.32	23.2

K. Data hasil uji kekerasan

Sudut Chamfer	Putaran Spindel (Rpm)	ZUD	ZPD	ZPL	
0°	600	96	109	96	
		92	103	102	
		94	102	102	
	800	95	109	105	
		96	107	102	
		101	109	104	
	1000	102	115	102	
		104	110	106	
		102	111	106	
	30°	600	99	114	100
			96	112	104
			99	104	105
800		98	120	105	
		102	123	108	
		105	110	102	
1000		97	127	103	
		107	124	108	
		108	123	110	

L. Hasil perhitungan uji kekerasan

Sudut Chamfer	Putaran Spindel (Rpm)	Pengulangan Spesimen	Nilai Kekerasan (BHN)		
			Zud	Zpd	Zpl
0°	600	3	94	105	100
	800	3	97	108	104
	1000	3	103	112	105
30°	600	3	98	110	103
	800	3	102	118	105
	1000	3	104	125	107