

**PENGARUH *BOL* DAN SUDUT *CHAMFER* TERHADAP KEKUATAN
LELAH SAMBUNGAN *SIMILAR LAS GESEK* A6061**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



WILLIAM MELKISEDEKH GULTOM

NIM. 145060201111081

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2019

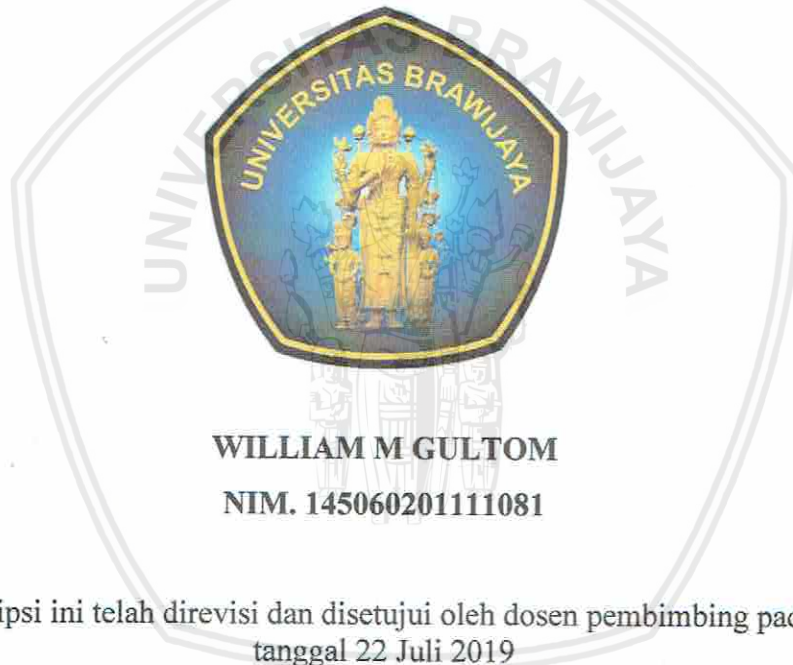
LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH *BOL* DAN SUDUT *CHAMFER* TERHADAP KEKUATAN
LELAH SAMBUNGAN *SIMILAR LAS GESEK* A6061**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



WILLIAM M GULTOM

NIM. 145060201111081

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing pada
tanggal 22 Juli 2019

Dosen Pembimbing

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

**Mengetahui,
Ketua Program Studi S1**

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

JUDUL SKRIPSI:

PENGARUH *BOL* DAN SUDUT *CHAMFER* TERHADAP KEKUATAN LELAH
SAMBUNGAN *SIMILAR LAS* GESEK A6061

Nama Mahasiswa : William M Gultom

NIM : 145060201111081

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik Manufaktur

KOMISI PEMBIMBING:

Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.

TIM DOSEN PENGUJI:

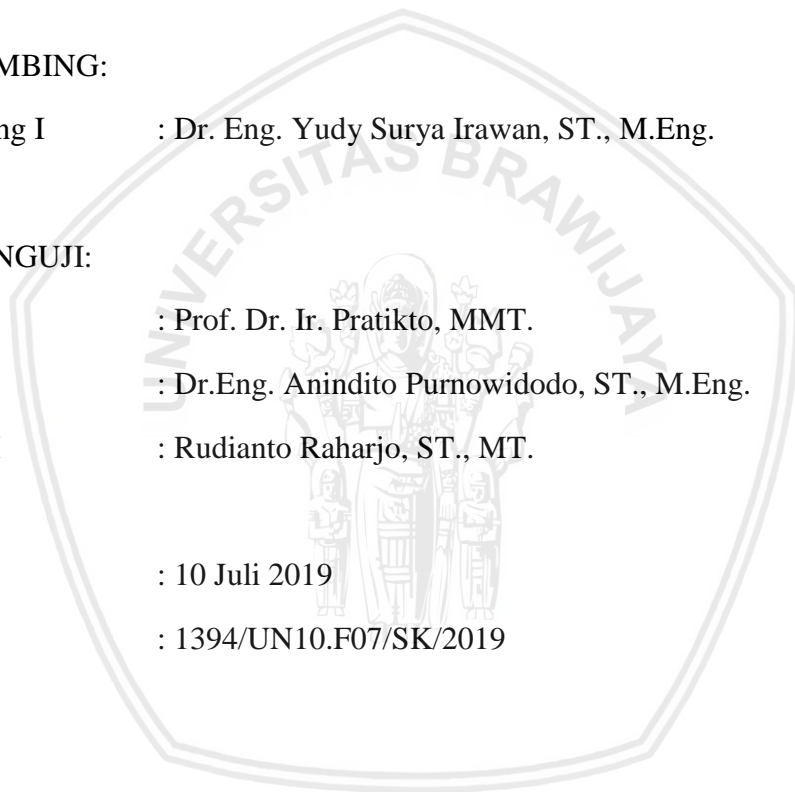
Dosen Penguji I : Prof. Dr. Ir. Pratikto, MMT.

Dosen Penguji II : Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng.

Dosen Penguji III : Rudianto Raharjo, ST., MT.

Tanggal Ujian : 10 Juli 2019

SK Penguji : 1394/UN10.F07/SK/2019



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

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

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 19 Juli 2019

Mahasiswa



William M Gultom

NIM. 145060201111081

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 086/UN10.F07.12.21/PPP/2019

Sertifikat ini diberikan kepada :

WILLIAM M GULTOM

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH *BOL* DAN SUDUT *CHAMFER* TERHADAP KEKUATAN LELAH
SAMBUNGAN SIMILAR LAS GESEK A6061**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **23 JUL 2019**

Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

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



*Terima Kasih
untuk...
Ayah dan Ibu*

KATA PENGANTAR

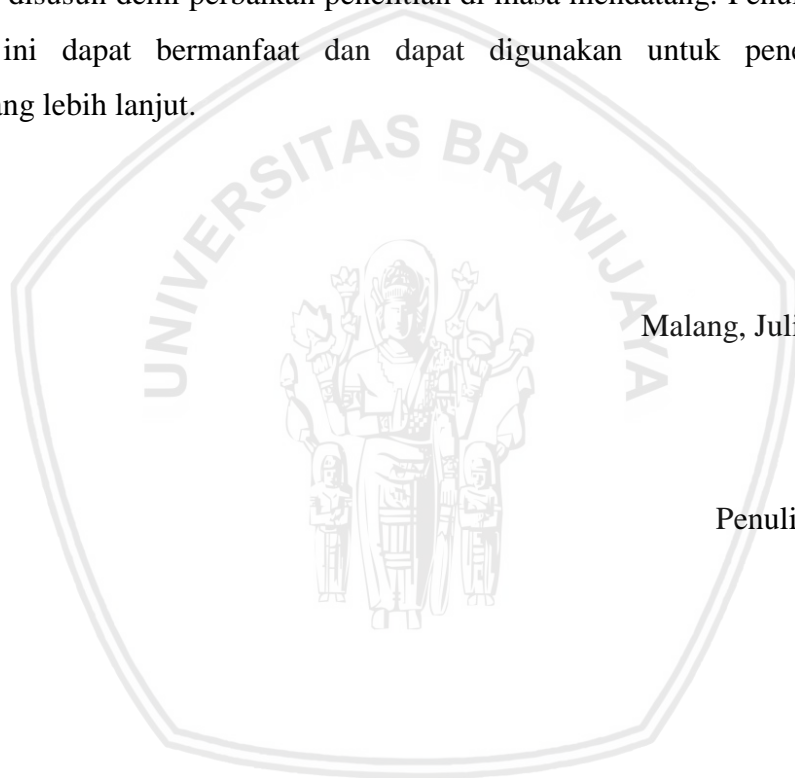
Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus atas berkat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“Pengaruh *BOL* Dan Sudut *Chamfer* Terhadap Kekuatan Lelah Sambungan *Similar* Las Gesek A6061”** dengan baik.

Skripsi ini disusun dengan tujuan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Setelah melalui berbagai tahapan, akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan berkat dukungan dari berbagai pihak. Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yesus yang telah memberikan berkat dan anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi.
2. Orang tua tercinta, Victor Gultom, S.Pd dan Marihati Br Sebayang yang telah memberikan doa serta dukungan tanpa henti sehingga penulis termotivasi untuk menyelesaikan skripsi, serta saudara terkasih Winettow Santer Gultom, S.E yang selalu memberikan semangat, canda tawa, kasih sayang serta dukungan yang tiada henti untuk penulis.
3. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
4. Bapak Teguh Widodo, ST., M.Eng, Ph.D., selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
5. Bapak Dr.Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
6. Bapak Dr.Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng., sebagai Dosen Pembimbing Skripsi yang telah banyak memberikan bimbingan, nasihat, motivasi, doa dan pengarahan.
7. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah banyak memberikan ilmu yang sangat bermanfaat selama dalam perkuliahan.
8. Seluruh pegawai dan karyawan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membantu segala administrasi saat perkuliahan maupun skripsi.
9. Rekan, teman, sekaligus partner skripsi penulis, Brian, Okzendo, Yolan, dan Prayogo yang banyak membantu skripsi penulis.

10. Teman- teman angkatan 2014 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang selalu memberikan dukungan dan semangat selama proses perkuliahan dan skripsi.
11. Teman-teman Kelompok Bermain yang menemani masa-masa perkuliahan dengan penuh warna.
12. Teman – teman kontrakan penulis yang selalu memberikan motivasi dalam pengerjaan skripsi hingga selesai.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna karena keterbatasan ilmu dari penulis dan kendala-kendala yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Maka dari itu penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca terhadap skripsi yang telah disusun demi perbaikan penelitian di masa mendatang. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk penelitian dan pengembangan yang lebih lanjut.



Malang, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Rumusan Masalah	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Tujuan Penelitian	2
1.6 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Penelitian Sebelumnya	3
2.2 Aluminium dan Paduannya	3
2.2.1 Penggolongan Aluminium Paduan	5
2.2.2 Sifat Mampu Las Aluminium	8
2.3 Pengelasan	8
2.3.1 Definisi Pengelasan	8
2.3.2 Klasifikasi Pengelasan	8
2.4 Las Gesek	9
2.4.1 Las Gesek (<i>Friction Welding</i>)	9
2.4.2 Jenis-Jenis <i>Friction Welding</i>	10
2.4.3 Kelebihan Las Gesek	13
2.5 <i>Burn-off Length</i>	14
2.6 Kelelahan	14
2.6.1 Kurva S-N	16
2.6.2 <i>Rotating Cantilever Bending Fatigue Tester</i>	17
2.7 Aplikasi Pengelasan Gesek	18
2.8 Hipotesis	18



BAB III METODE PENELITIAN	21
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	21
3.2 Variabel Penelitian	21
3.2.1 Variabel Bebas	21
3.2.2 Variabel Terikat.....	21
3.2.3 Variabel Terkontrol	22
3.3 Alat dan Bahan	22
3.3.1 Alat	22
3.3.2 Bahan.....	25
3.3.3 Dimensi Spesimen.....	25
3.4 Instalasi Penelitian.....	26
3.4.1 Instalasi Mesin.....	26
3.4.2 Instalasi Alat Uji Kekuatan Lelah	26
3.5 Prosedur Penelitian.....	27
3.5.1 Pengelasan Gesek	27
3.5.2 Pengujian Kelelahan.....	28
3.6 Diagram Alir.....	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Data Hasil Pengujian	31
4.2 Pembahasan	33
4.2.1 Diagram S-N Kekuatan Lelah.....	33
4.2.2 Diagram Kekuatan Tarik	34
4.2.3 Bentuk Patahan.....	35
4.2.3.1 Foto Makro.....	35
4.2.3.2 Uji <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	35
4.2.3 Diagram Suhu Pengelasan.....	36
BAB V PENUTUP	39
5.1 Kesimpulan.....	39
5.2 Saran	39
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Sifat Fisik <i>Aluminium Alloys</i>	4
Tabel 2.2	Komposisi Kimia A6061-T6	4
Tabel 2.3	Sifat Mekanik Paduan A6061-T6	5
Tabel 2.4	Sistem Penamaan Paduan Aluminium Tempa.....	5
Tabel 3.1	Komposisi Kimia Aluminium A6061.....	25
Tabel 4.1	Data Hasil Uji Lelah (<i>Fatigue</i>).....	33



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram fase <i>pseudo-binary</i> pada paduan Al-Mg-Si	7
Gambar 2.2	Mekanisme las gesek	9
Gambar 2.3	<i>Friction wtir welding</i>	10
Gambar 2.4	Mekanisme <i>friction stir welding</i>	10
Gambar 2.5	<i>Inertia friction welding</i>	11
Gambar 2.6	<i>Linear friction welding</i>	11
Gambar 2.7	<i>Continious drive friction welding</i>	12
Gambar 2.8	Parameter <i>friction welding</i>	12
Gambar 2.9	<i>Burn-off length</i>	14
Gambar 2.10	Tiga siklus tegangan <i>fatigue</i>	15
Gambar 2.11	Kurva S-N aluminium 6061-T6 <i>aluminium alloy</i>	16
Gambar 2.12	Contoh kurva S-N pada baja	16
Gambar 2.13	Skema <i>rotating cantilever bending fatigue testing machine</i>	18
Gambar 2.14	Aplikasi las gesek dari paduan Al-Mg-Si	18
Gambar 3.1	<i>Stopwatch</i>	22
Gambar 3.2	Jangka sorong	22
Gambar 3.3	Mesin bubut	23
Gambar 3.4	Mesin las <i>continous drive friction welding</i>	23
Gambar 3.5	<i>Rotating cantilever bending fatigue testing machine</i>	24
Gambar 3.6	<i>Power hacksaw</i>	24
Gambar 3.7	Kamera	24
Gambar 3.8	<i>Thermogun</i>	25
Gambar 3.9	Dimensi benda kerja	25
Gambar 3.10	Dimensi benda kerja	25
Gambar 3.11	Dimensi benda kerja	25
Gambar 3.12	Skema instalasi mesin	26
Gambar 3.13	Instalasi alat uji kekuatan lelah	26
Gambar 3.14	Diagram alir penelitian	29
Gambar 4.1	Diagram S-N uji kekuatan lelah tiap variasi sudut <i>chamfer</i> a6061	33
Gambar 4.2	Hubungan kekuatan tarik terhadap sudut <i>chamfer</i>	34
Gambar 4.3	Foto makro sudut <i>chamfer</i> 0°	35
Gambar 4.4	Foto makro sudut <i>chamfer</i> 30°	35

Gambar 4.5 Foto makro sudut *chamfer* 45° 35

Gambar 4.6 Bentuk patahan hasil kekuatan uji lelah a6061 (SEM)..... 36

Gambar 4.7 Diagram suhu pengelasan a6061 variasi sudut *chamfer* 36



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Foto Uji Makro

Lampiran 2 Foto Uji SEM

Lampiran 3 Foto Spesimen Sebelum Pengelasan



RINGKASAN

William Melkisedekh Gultom, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2019, *Pengaruh BOL dan Sudut Chamfer Terhadap Kekuatan Lelah Sambungan Similar Las Gesek A6061* Dosen Pembimbing: Yudy Surya Irawan.

Las gesek (*Friction welding*) adalah pengelasan dengan memanfaatkan energi panas yang terjadi disebabkan oleh adanya gesekan antara dua buah material dan panas dari hasil gesekan akan menjadikan material menjadi plastis dan dalam kondisi panas pergerakan antar kedua logam berhenti, kemudian diaplikasikan gaya tekan aksial hingga terjadi sambungan las.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh BOL dan sudut *chamfer* terhadap kekuatan lelah sambungan las gesek *similar* aluminium A6061 dengan variasi sudut *chamfer* 0°, 30°, 45°, kecepatan putaran *spindle* yang digunakan sebesar 1600 rpm, gaya penekanan awal yaitu 7.000 N, *burn off-length* 3 mm, *upset force* 35.000 N, dan *holding time* selama 20 detik.

Hasil penelitian ini diketahui bahwa urutan siklus yang paling lama terjadi patah yaitu dimulai dari variasi sudut *chamfer* 30°, 0°, 45°. Hasil penelitian yang didapat, yaitu sudut *chamfer* 30° memiliki siklus yang tertinggi 858.572 siklus dengan pembebanan 22 MPa dan siklus terpendek sudut *chamfer* 45° 105.716 siklus dengan pembebanan 55 MPa. Hal ini dipengaruhi oleh kekuatan uji tarik yang lebih tinggi dimiliki sudut *chamfer* 30° dan membutuhkan waktu yang lebih lama dan siklus yang lebih banyak untuk terjadi patahan.

Kata Kunci: Aluminium A6061, las gesek, sudut *chamfer*, *burn off length*

SUMMARY

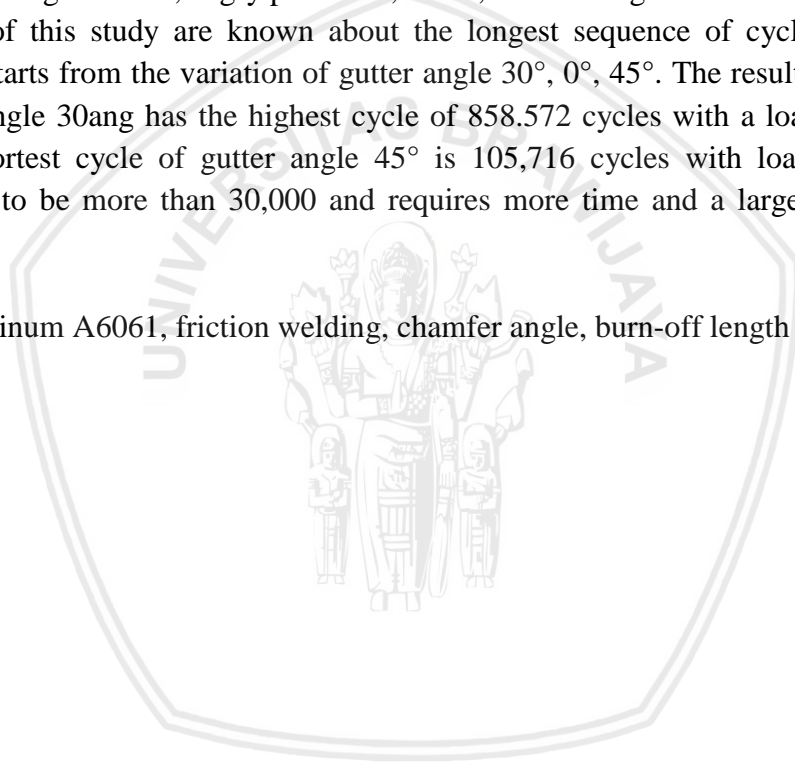
William Melkisedekh Gultom, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, July 2019, Effect of BOL and Chamfer Angle on Fatigue Strength of Similar Friction Welding A6061 Advisor: Yudy Surya Irawan.

Welding friction (friction welding) is welding using heat energy that occurs because there is a relationship between the fruit material and the heat from the friction results will make the material plastic and in the heat of movement between weld metals.

This study was conducted to determine the effect of BOL and gutter angle on the fatigue strength of aluminum welding joints that are similar to A6061 with variations of chamfer angle 0° , 30° , 45° , spindle rotation speed used at 1600 rpm, initial force of only 7,000 N, burn off-length 3 mm , angry power 35,000 N, and holding time for 20 seconds.

The results of this study are known about the longest sequence of cycles that are damaged which starts from the variation of gutter angle 30° , 0° , 45° . The results obtained, namely the gut angle 30ang has the highest cycle of 858.572 cycles with a loading of 22 MPa and the shortest cycle of gutter angle 45° is 105,716 cycles with loading of 55 MPa. This needs to be more than 30,000 and requires more time and a larger cycle for faults to occur.

Keywords: Aluminum A6061, friction welding, chamfer angle, burn-off length





BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi pengelasan merupakan salah satu jenis teknologi untuk penyambungan logam yang telah lama dipakai dan digunakan dalam konstruksi permesinan. Untuk jenis pengelasan ada bermacam-macam tergantung jenis material apa yang akan dilakukan pengelasan. Teknologi pengelasan sendiri digunakan karena fleksibilitas terhadap penggunaan dan juga biaya yang relatif murah. Salah satu bahan yang dapat dilakukan pengelasan yaitu aluminium.

Aluminium merupakan salah satu jenis logam yang memiliki sifat ketahanan terhadap korosi, penghantar panas yang baik, dan memiliki sifat mudah untuk dibentuk. Material Aluminium terdapat banyak kelebihan tetapi tetap memiliki kekurangan, yaitu memiliki sifat daya hantar panas yang tinggi sehingga sulit untuk dilakukan pengelasan, untuk mengatasi kekurangan sifat aluminium tersebut digunakan jenis pengelasan *friction welding*. Untuk jenis pengelasan *friction welding* memiliki kelebihan dibanding pengelasan yang lain karena tidak memerlukan gas dalam proses pengelasannya, tidak menimbulkan percikan api, sehingga tidak terjadi cacat solidifikasi juga dapat menyambung dua material logam yang berbeda (*dissimilar*). (Iswar, 2012)

Pengelasan gesek (*friction welding*) adalah pengelasan dengan memanfaatkan energi panas yang terjadi disebabkan oleh adanya gesekan antara dua buah material dan panas dari hasil gesekan akan menjadikan material menjadi plastis. Dalam kondisi panas pergerakan antar kedua logam berhenti, kemudian diaplikasikan gaya tekan aksial, hingga terjadi sambungan las (Satoto, 2012).

Pentingnya temperatur pada pengelasan, sehingga diperlukan pengawasan temperatur karena dapat mempengaruhi kualitas dari pengelasan. Kamera termografi dapat menjadi salah satu alat yang digunakan untuk mengetahui perubahan temperatur.

Dengan digunakannya alat tersebut maka kita dapat mengetahui parameter batas pengelasan dan perubahan suhu saat terjadi pengelasan, sehingga nantinya diketahui batas maksimum parameter pengelasan. Dengan dilakukannya pemantauan terhadap suhu pada saat pengelasan, maka kita dapat mengetahui kekurangan yang mengakibatkan kesalahan selama proses pengelasan.

1.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah pada penelitian ini adalah pada poros kendaraan bermotor dibutuhkan material yang ringan dan kuat seperti sambungan aluminium.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibuat, permasalahan yang akan diteliti terkait dengan bagaimana pengaruh BOL dan sudut *chamfer* terhadap kekuatan leleh sambungan *friction welding* A6061?

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Pendinginan dilakukan di udara.
2. Mesin bubut yang digunakan kondisi baik dan sudah terkalibrasi.

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh BOL dan sudut *chamfer* terhadap kekuatan leleh sambungan las gesek A6061 dan memperbaiki kualitas produk hasil sambungan las gesek A6061.

1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Menghasilkan produk las gesek yang baik.
2. Dapat dijadikan referensi untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan las gesek.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Pada penelitian yang telah dilakukan Sahin dan Misirli (2007) tentang las gesek, didapatkan bahwa kekuatan tarik pada sambungan terus meningkat seiring peningkatan waktu gesekan serta tekanan. kekuatan maksimum yang diperoleh hingga 92% dari kekuatan tarik baja *austenite*.

Ardhiyanto dkk (2010), dalam penelitian pengelasan gesek dengan paduan Al – Mg – Si menarik kesimpulan bahwa penggunaan *friction time* mempengaruhi kekuatan tarik dari sambungan las gesek, dimana kekuatan tarik rata – rata tertinggi pada *friction time* 60 detik dengan kekuatan tarik 136,92 N/mm² dan kekuatan tarik terendah pada *friction time* 180 detik yakni 74,74 N/mm².

Irawan dkk (2012), dalam penelitiannya yang berjudul “*Tensile Strength of Weld Joint Produced by Spinning Friction Welding of Round Aluminum A6061 with Various Chamfer Angles*” menyimpulkan bahwa sudut *chamfer* mempengaruhi kekuatan tarik sambungan las gesek. Sudut *chamfer* 30° menghasilkan kekuatan tarik maksimal. Dari analisa foto makro struktur sambungan las didapat luas daerah HAZ yang kecil sehingga menyebabkan kekuatan tarik maksimal, porositas di sambungan las gesek yang minimal serta luas daerah *Fully Plasticized Zone* mempengaruhi kekuatannya juga.

2.2 Aluminium dan Paduannya

Aluminium termasuk salah satu unsur logam yang banyak ditemukan di bumi. Aluminium pertama kali ditemukan oleh ahli kimia yang berasal dari Jerman, yang bernama Friedrich Wöhler pada tahun 1827. Aluminium yang terdapat di bumi merupakan bentuk dari senyawa kimia yang disebut bauksit. Komposisi bauksit tersebut terdiri dari tanah tawas, besi oksida, asam silikat dan aluminium oksida.

Bauksit selain terdapat di beberapa negara seperti Prancis, Italia. Selain itu bauksit juga banyak terdapat di Afrika, Amerika bahkan di Indonesia sendiri terdapat potensi bauksit, yaitu di daerah Riau, Kalimantan Barat dan juga Kalimantan Selatan. Namun untuk pengolahan bauksit di Indonesia sendiri masih belum maksimal dikarenakan belum adanya *smelter* untuk mengolah bauksit tersebut.

Aluminium sendiri dapat ditemukan dalam keadaan murni yang memiliki kandungan 99,9% dan memiliki kandungan terendah 99% dengan nilai kekuatan tarik 60 N/mm². Kekuatan tarik tersebut dapat dinaikkan dengan proses pengerjaan dingin hingga 140 N/mm² dan juga dapat meningkat terus tergantung daripada proses pengerjaannya.

Aluminium memiliki keunggulan dari logam lain. Untuk aluminium sendiri termasuk logam yang ringan dan mempunyai kekuatan tinggi, tahan korosi, juga sebagai konduktor listrik yang baik. Karakteristik utama aluminium yaitu ringan (berat jenis = 2,7 gr/cm³) dan memiliki sifat yang mudah untuk dibentuk. Sifat fisik aluminium paduan dapat dilihat dari data yang terdapat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Sifat Fisik *Aluminum Alloys*

<i>Aluminum Alloys</i>	<i>Density</i>		<i>Heat Capacity</i>		<i>Thermal Conductivity</i>		<i>Thermal Diffusivity</i>	
	<i>g/cm³</i>	<i>lb/in³</i>	<i>j/kg K</i>	<i>cal_{ir}/g.°C</i>	<i>W/m.K</i>	<i>cal_{ir}/cm.s.°C</i>	<i>mm²/s</i>	<i>cm²/s</i>
1100	2,71	0,098	963	0,23	222	0,53	85	0,85
2014	2,80	0,101	963	0,23	193	0,46	71	0,71
5052	2,68	0,097	963	0,23	138	0,33	54	0,54
6061	2,70	0,098	963	0,23	172	0,41	66	0,66
7075	2,80	0,101	963	0,23	121	0,29	45	0,45

Sumber: Eagar, ASM Handbook Vol. 06 (1993)

Pada Tabel 2.1 dapat dilihat perbandingan sifat fisik antara berbagai paduan aluminium paduan seperti massa jenis terkecil dimiliki oleh aluminium paduan 5052 dengan 2,68 g/cm³ sementara massa jenis terbesar dimiliki oleh aluminium paduan 7075 dan aluminium paduan 2014 sebesar 2,80 g/cm³. Selain itu, konduktivitas termal yang menunjukkan seberapa besar bahan tersebut dapat menghantarkan panas tertinggi dimiliki oleh aluminium paduan 1100 sebesar 222 W/m.K dan yang terendah dimiliki oleh aluminium paduan 7075 sebesar 121 W/m.K. Sementara untuk difusivitas termal atau kemampuan sebuah bahan dalam menyerap panas tertinggi dimiliki oleh aluminium paduan 1100 sebesar 85 mm²/s dan yang terendah dimiliki oleh aluminium paduan 7075 sebesar 45 mm²/s. Sementara itu, standar komposisi kimia yang terdapat pada aluminium paduan A 6061-T6 dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2
Komposisi Kimia A6061-T6

Paduan	Al (%)	Mg (%)	Si (%)	Fe (%)	Mn (%)	Zn (%)	Cu (%)	Cr (%)	Ti (%)	Kandungan lainnya (%)
6061	95,8-98,6	0,80-1,2	0,40-0,80	Max 0,70	Max 0,15	Max 0,25	0,15-0,40	0,040-0,35	Max 0,15	Max 0,15

Sumber: ASM Aerospace Specification Metals Inc. (2015)

Tabel 2. 3
Sifat Mekanik Paduan A6061-T6

Keadaan	Kekuatan Tarik (kgf/mm ²)	Kekuatan Mulur (kgf/mm ²)	Perpanjangan (%)	Kekuatan Geser (kgf/mm ²)	Kekerasan Brinell	Batas Lelah (kgf/mm ²)
0	12,6	5,6	30	8,4	30	6,3
T4	24,31	14,8	28	16,9	65	9,5
T6	31,6	28,0	15	21,0	95	9,5

Sumber: Surdia (1999:140)

Pada Tabel 2.3 dapat dilihat bahwa kandungan yang paling dominan selain kandungan unsur aluminium itu sendiri dalam aluminium 6061 adalah unsur magnesium dan unsur silikon. Adanya kandungan Magnesium dan Silikon untuk meningkatkan daya tahan karat aluminium. Unsur Mg juga meningkatkan sifat mampu mesin dan mampu bentuk dari aluminium tanpa mengurangi sifat *ductile* serta membuat aluminium paduan tersebut mampu dilas dengan baik, sedangkan pada Tabel 2.3 menjelaskan sifat mekanik dari A6061 dan yang akan digunakan pada penelitian ini adalah A6061-T6.

2.2.1 Penggolongan Aluminium Paduan

Penggunaan empat digit yang berfungsi untuk mengidentifikasi aluminium dan paduan aluminium. Standarisasi logam aluminium menurut *American Standart Testing Materials* (ASTM) menggunakan angka dalam penetapan golongan aluminium paduan. Cara penetapan golongan aluminium berdasarkan paduannya ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4
Sistem Penamaan Paduan Aluminium Tempa

Unsur Paduan Utama	No.Seri
Aluminum, 99% dan lebih besar	1xxx
Copper	2xxx
Manganese	3xxx
Silicon	4xxx
Magnesium	5xxx
Magnesium dan Silicon	6xxx
Zinc	7xxx
Unsur Lain	8xxx

Sumber: Avner (1997:484)

Cara pembacaan penggolongan aluminium berdasarkan Tabel 2.4:

1. Angka pertama menunjukkan jenis– jenis unsur paduan yang dimiliki logam aluminium.
2. Angka kedua menunjukkan sifat khusus misalnya : angka kedua menunjukkan bilangan nol (0) maka tidak memerlukan perhatian khusus dan jika angka kedua

menunjukkan angka satu (1) sampai dengan sembilan (9) memerlukan perhatian khusus.

3. Dua angka terakhir tidak memiliki pengertian, namun angka ketiga menunjukkan modifikasi dari paduan dalam perdagangan.

Contoh pembacaan:

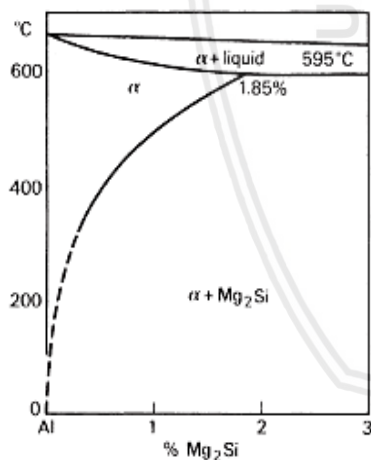
1. ASTM 6061 artinya Adalah paduan aluminium – magnesium – silikon tanpa perhatian khusus dan mengalami modifikasi dari paduan Al – Mg – Si
2. ASTM 1030 artinya Adalah aluminium murni tanpa perhatian khusus, dengan kadar aluminium sebesar 99,30%
3. ASTM 1230 artinya Adalah aluminium murni dengan perhatian khusus dengan kadar aluminium sebesar 99,30

Penetapan standarisasi logam aluminium menurut *American society for materials* (ASTM) adalah dengan menggunakan angka untuk menetapkan penggolongan aluminium paduan. Adapun sifat umum dari berbagai jenis paduan menurut ASTM adalah sebagai berikut:

1. Aluminium Murni (kandungan aluminium 99%), seri 1xxx
 - a. Memiliki kemurnian antara 99%-99.9%.
 - b. Tahan karat.
 - c. Konduksi panas dan konduksi listrik.
 - d. Kekuatan rendah.
2. Copper (Al-Cu), seri 2xxx
 - a. Tidak tahan korosi.
 - b. Sifat mampu lasnya kurang baik, sehingga banyak digunakan pada pesawat terbang dan konstruksi keeling.
3. Manganase (Al-Mn), seri 3xxx
 - a. Tidak dapat diberikan perlakuan panas sehingga untuk memperbaiki kekuatannya hanya bisa dilakukan dengan cara pengerjaan dingin dalam pembuatannya.
 - b. Tahan korosi.
 - c. Memiliki kekuatan yang tinggi.
4. Silicon (Al-Si), seri 4xxx
 - a. Tidak dapat diperlakukan panas
 - b. Dalam keadaan cair memiliki sifat mampu alir yang baik dan dalam pembekuannya tidak terjadi retak

5. Magnesium (Al-Mg), seri 5xxx
 - a. Tahan terhadap korosi
 - b. Memiliki sifat mampu las yang baik tapi tidak dapat diperlakukan panas
6. Magnesium dan silikon (Al-Mg-Si), seri 6xxx
 - a. Dapat diperlakukan panas
 - b. Memiliki sifat potong
 - c. Daya tahan terhadap korosi yang baik
 - d. Memiliki sifat mampu las yang baik
7. Zinc (Al-Zn), seri 7xxx
 - a. Dapat diperlakukan panas
 - b. Tahan korosi
 - c. Unsur yang ditambahkan adalah Mg, Cu dan Cr

Paduan Al – Mg – Si termasuk dalam jenis yang dapat diperlakukan-panaskan dan mempunyai sifat mampu potong yang baik, mampu las, dan daya tahan korosi yang baik. Apabila Magnesium dan Silikon dipadukan maka akan membentuk Magnesium Silikat (Mg_2Si). Diagram fasa Al- Mg – Si ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram fasa *Pseudo-binary* pada paduan Al-Mg-Si
Sumber: Polmear (1995:63)

Pada Gambar 2.1 menunjukkan tentang diagram fasa Al – Mg – Si, diagram fasa ini bertujuan untuk mengetahui perubahan fasa yang terjadi pada material akibat perubahan temperatur maupun perubahan kandungan unsur paduan magnesium-silikon. Al – Mg – Si memiliki titik lebur $595^{\circ}C$ hingga memasuki fasa austenit yang merupakan daerah transisi antara fasa padat menjadi cair. Titik cair Al – Mg – Si sendiri berada pada suhu 660° . Pada pengelasan gesek, material tidak perlu mencair untuk dilakukan penyambungan. Material tersebut hanya perlu mencapai suhu rekristalisasi sehingga bisa menyatu. Suhu rekristalisasi dapat diketahui dengan rumus:

$$T_r = 0,4 - 0,5 T_c \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots(2-1)$$

Dengan:

T_r = Temperatur rekristalisasi ($^\circ\text{C}$)

T_c = Temperatur cair Al – Mg – Si ($^\circ\text{C}$)

2.2.2 Sifat Mampu Las Aluminium

Untuk pengelasan, terdapat sifat yang kurang baik di aluminium paduan bila dibandingkan dengan baja. Sifat – sifat yang kurang baik tersebut sebagai berikut.

1. Daya hantar panasnya yang tinggi maka sulit sekali untuk memanaskan dan mencairkan hanya sebagian kecil.
2. Mudah teroksidasi dan membentuk oksida aluminium Al_2O_3 yang mempunyai titik cair yang tinggi. Karena sifat ini maka peleburan antara logam dasar dan logam las menjadi terhalang.
3. Paduan aluminium mempunyai berat jenis rendah, karena itu banyak zat – zat lain yang terbentuk selama pengelasan akan tenggelam. Keadaan ini memudahkan tergangungnya zat – zat yang tidak dikehendaki ke dalamnya.
4. Karena titik cair dan viskositasnya rendah, maka daerah yang kena pemanasan mudah mencair dan jatuh menetes.

2.3 Pengelasan

2.3.1 Definisi Pengelasan

Pengelasan merupakan penyambungan dua bahan atau lebih didasarkan pada prinsip-prinsip proses difusi, sehingga dapat menyatukan bagian bahan yang disambung. Kelebihan sambungan las adalah konstruksi ringan, dapat menahan kekuatan yang tinggi, mudah pelaksanaannya, serta cukup ekonomis. Namun kelemahan yang paling utama adalah terjadinya perubahan struktur mikro bahan yang dilas, sehingga terjadi perubahan sifat fisik maupun mekanis dari bahan yang dilas (Riswan, 2008). Menurut DIN (*Deutsche Industrie Home*), Las (*welding*) adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilakukan pada keadaan lumer atau cair.

2.3.2 Klasifikasi Pengelasan

Pengklasifikasian las dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu, klasifikasi berdasarkan cara kerja dan berdasarkan energi yang digunakan. Berdasarkan klasifikasi tersebut

pengelasan yang paling sering digunakan yaitu dengan klasifikasi pengelasan berdasarkan cara kerja. Untuk klasifikasi berdasarkan cara kerja juga dibagi ke dalam tiga kelas utama yaitu:

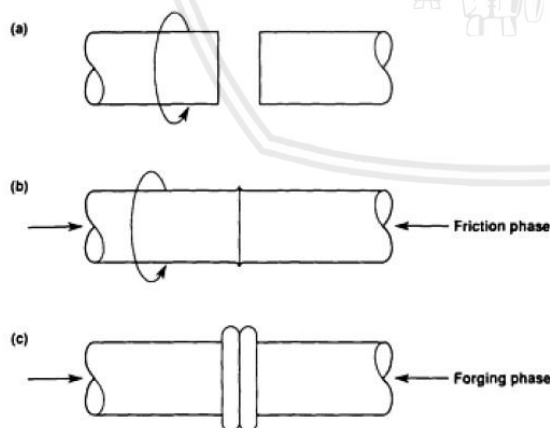
1. Pengelasan cair adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau semburan api gas yang terbakar.
2. Pengelasan tekan adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga jadi satu.
3. Pematiran adalah cara pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah. Dalam cara ini logam tidak ikut mencair.

2.4 Las Gesek

2.4.1 Las Gesek (*Friction Welding*)

Pengelasan gesek (*friction welding*) adalah proses pemanfaatan panas untuk penyambungan yang dihasilkan oleh gerak relatif dari dua permukaan yang akan disambungkan. Metode ini memanfaatkan perubahan langsung dari energi gerak menjadi energi panas untuk penyambungan tanpa ada sumber panas dari luar. Berdasarkan cara penggesekannya *friction welding* dibagi menjadi dua yaitu:

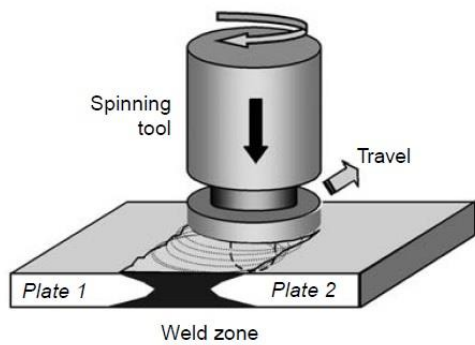
1. Las gesek ditunjukkan pada Gambar 2.2 sumber panas dari gesekan kedua permukaan benda kerja itu sendiri, contohnya *continous drive friction welding*.



Gambar 2.2 Mekanisme las gesek

Sumber: Elmer, ASM Handbook Vol. 06 (1993)

2. Las gesek dengan sumber panas dari gesekan kedua permukaan benda kerja yang akan dilas dengan pahat (*tool*), contohnya *friction stir welding*. pengelasan ini dapat dilakukan pada penyambungan dua logam yang berbeda jenisnya ditunjukkan pada Gambar 2.3. Ini merupakan kelebihan dari pengelasan ini.

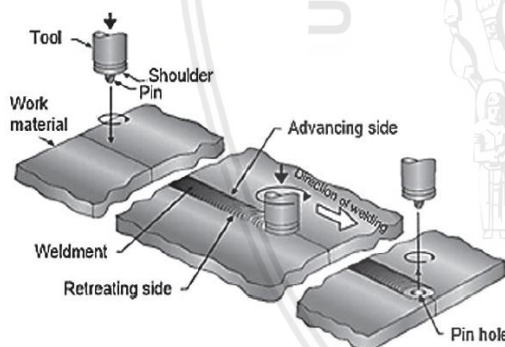


Gambar 2.3 Friction stir welding
Sumber: Blau (2008:385)

2.4.2 Jenis-Jenis Friction Welding

1. Friction Stir Welding

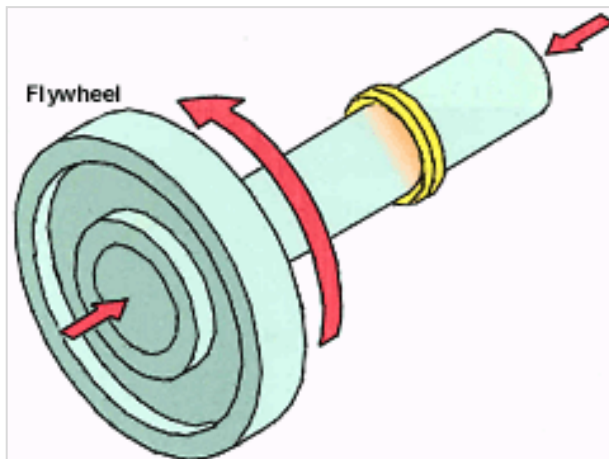
Friction Stir Welding adalah pengelasan gesek yang prosesnya tidak memerlukan bahan penambah. Panas yang dihasilkan didapat dari gesekan antara benda yang berputar dengan benda yang diam. Pengelasan gesek jenis ini ditunjukkan pada Gambar 2.4 digunakan dalam bidang penerbangan, otomotif, kereta dan perkapalan.



Gambar 2.4 Mekanisme *friction stir welding*
Sumber: Jauhari Tahir Khairuddin dkk (2012)

2. Inertia Friction Welding

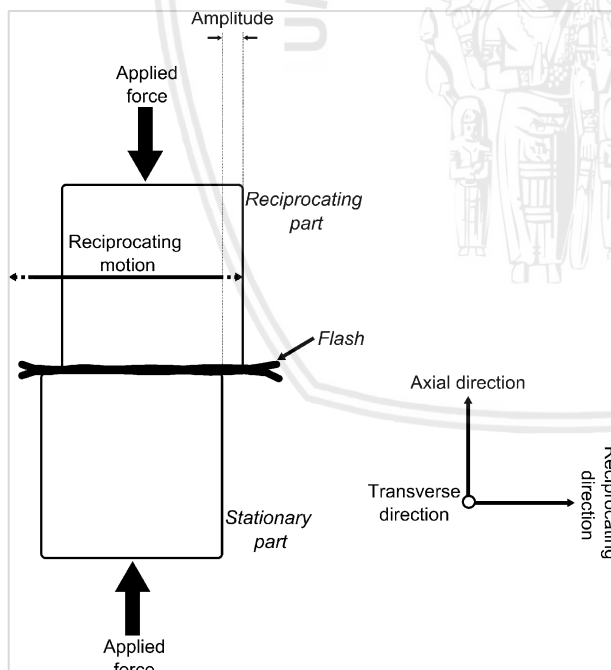
Inertia friction welding merupakan salah satu macam *friction welding* dimana gesekan terjadi antara benda kerja yang bergerak dan benda kerja yang diam. Benda kerja yang bergerak secara *rotary* dengan kecepatan konstan, pada bagian benda kerja yang berputar terpasang *flywheel* yang bertujuan untuk menyimpan energi. Pada Gambar 2.5 menunjukkan ketika energi dan kecepatan yang dibutuhkan telah cukup maka *flywheel* akan melepaskan diri kemudian kedua benda kerja akan bertemu dengan penambahan gaya axial.



Gambar 2.5 Inertia friction welding
Sumber: Kallee (1999)

3. Linear Friction Welding

Linear friction welding merupakan proses pengelasan dua buah benda padat dimana penggabungan diperoleh dari panas yang didapatkan dari gesekan antara benda kerja yang bergerak maju mundur secara linear dengan benda kerja yang tidak bergerak serta penambahan gaya yang disebut dengan “*upset*” untuk menggabungkan material ditunjukkan pada Gambar 2.6.

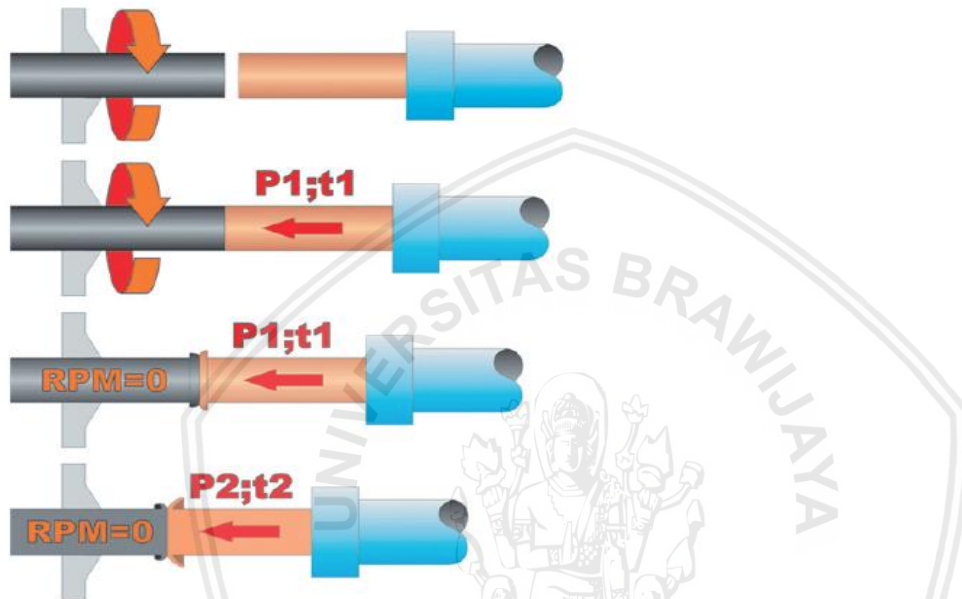


Gambar 2.6 Linear friction welding
Sumber: Bhamji (2010)

4. Continuous Drive Friction Welding

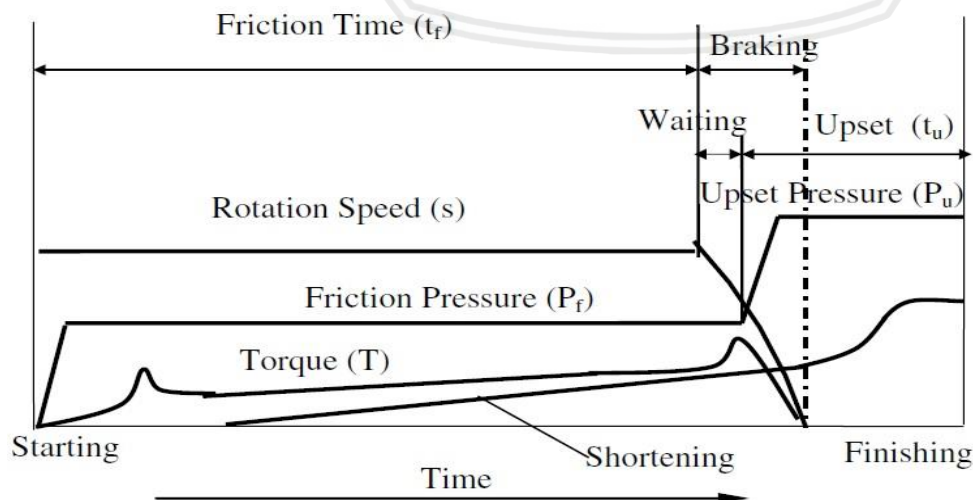
Las gesek merupakan pengelasan yang memanfaatkan panas yang berasal dari gesekan langsung dari benda itu sendiri dimana salah satu benda kerja diputar dan satunya diam dan menekan.

Mekanisme proses ini adalah ketika salah satu benda diputar dengan kecepatan tinggi dan salah satu benda yang lain menekan benda yang berputar tersebut. Akibat dari penekan tersebut timbul panas sehingga partikel dari dua logam dapat saling berikatan dan perputaran yang terjadi mengakibatkan partikel dari dua benda tersebut teraduk. Sedangkan penekanan menyebabkan partikel terdorong mengisi celah-celah kosong sekaligus mengeluarkan udara. Pada Gambar 2.7 dibawah ini menghasilkan proses penyambungan logam tanpa pencairan atau yang dinamakan *solid state process*.



Gambar 2.7 Continuous drive friction welding
Sumber: Alves dkk (2012)

Pada pengelasan las gesek ini terdapat parameter-parameter yang harus diperhatikan ketika proses penyambungan, Terutama parameter waktu dan gaya yang diberikan ketika proses pengelasan ditunjukkan pada Gambar 2.8 dibawah.



Gambar 2.8 Parameter friction welding
Sumber: Sahin (2008)

Dari Gambar 2.8 terdapat beberapa parameter yang harus diketahui sebelum melakukan pengelasan gesek, yaitu:

1. *Friction Time*

Friction time adalah waktu yang dibutuhkan logam untuk bergesekan hingga dapat menyatu dalam proses pengelasan gesek. Untuk parameter ini dapat juga diganti dengan *burn-off length (BOL)*. *Burn-off length* adalah panjang dari sebagian logam yang akan habis karena panas yang timbul akibat gesekan saat proses pengelasan gesek dan membuat dua logam yang bergesekan menyatu.

2. *Friction Pressure*

Friction pressure adalah tekanan yang diberikan pada logam yang tidak berputar sehingga dapat menekan logam yang berputar dan mengakibatkan gesekan. Tekanan tersebut menghasilkan panas yang semakin besar sehingga dapat melunakkan bagian yang bergesekan dan dua logam tersebut dapat menyatu.

3. *Upset Time*

Upset time adalah waktu yang diberikan kepada dua buah logam yang telah menyatu akibat pengelasan gesek untuk proses penahanan (*holding*) agar ikatannya semakin kuat.

4. *Upset Pressure*

Upset pressure adalah tekanan tambahan yang diberikan setelah dua buah logam menyatu akibat pengelasan gesek untuk memperkuat ikatan yang terbentuk.

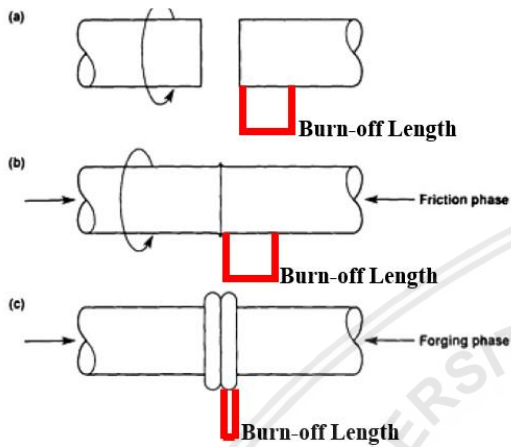
2.4.3 Kelebihan Las Gesek (*Friction Welding*)

Ada beberapa hal yang harus menjadi pertimbangan dalam penyambungan logam. Sama halnya ketika *Friction welding* harus dilakukan untuk menyambung logam. Ada beberapa kelebihan dari pengelasan ini yakni :

1. Biaya yang murah dalam melaksanakan *friction welding*.
2. Daerah HAZ yang dihasilkan dalam pengelasan ini sangat sempit.
3. Kekuatan yang dihasilkan pada sambungan *friction welding* hampir sama dengan kekuatan logam induk.
4. Dapat dilakukan pada logam yang berbeda.
5. Meminimalisir energi yang dibutuhkan ketika proses pengelasan.
6. Pengelasan pada temperatur rendah dapat mempertahankan mikrostruktur dan sifat material.

2.5 Burn-off Length

Burn-off length merupakan panjang material *friction welding* yang berkurang akibat gesekan antara dua spesimen, dimana salah satu spesimen diberi gaya tekan sehingga akan menimbulkan panas pada dua spesimen tersebut dan terjadinya deformasi pada spesimen saat proses pengelasan. Pada Gambar 2.9 total dari pemendekan adalah total panjang spesimen yang berkurang akibat gesekan dan gaya tekan pada waktu.



Gambar 2.9 Burn-off Length

Sumber: ASM Handbook Volume 06 (1993)

$$T_p = L_0 - L \dots \dots \dots (2-4)$$

dengan:

T_p = Total pemendekan (mm)

L_0 = Panjang benda uji sebelum di las (mm)

L = Panjang benda uji akhir setelah di las (mm)

2.6 Kelelahan

Kelelahan atau biasa dikenal dengan *fatigue* merupakan fenomena patahnya logam akibat pembebanan yang diberikan berulang dalam jumlah siklus tertentu. Menurut *American Society of Testing Material*, kelelahan diartikan sebagai proses perubahan yang progresif pada struktur secara permanen di lokasi tertentu atau terlokalisir yang disebabkan oleh siklus pebebanan berulang, dengan akumulasi dari perubahan ini akan mengakibatkan retak ataupun patahan. Ada tiga proses terjadinya kelelahan, yaitu :

1. Naiknya tegangan pada daerah retak yang dapat menimbulkan adanya konsentrasi tegangan yang kemudian akan terjadi bentukan plastis. Kemudian terjadi retak mikro pada daerah tersebut.
2. Retak mikro kemudian berkembang dan merambat bila terus diberikan pembebanan.

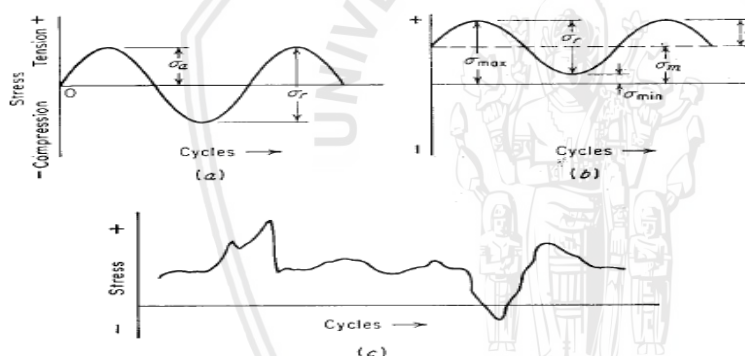
3. Jika retak merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang sisa yang belum retak dan akhirnya terjadi patahan.

Pengamatan tentang kelelahan logam dilakukan sejak 1903 oleh Ewing dan Humparey yang mengarah pada lahirnya teori mekanisme patah lelah. Mekanisme ini dibagi menjadi 3 tahap kejadian yaitu:

1. Tahap awal terjadinya retakan (*crack inisiation*).
2. Tahap penjaralan retakan (*crack propagation*).
3. Tahap akhir (*final fracture*).

Karakteristik kelelahan ada dua jenis yaitu karakteristik makro dan karakteristik mikro. Karakteristik makro merupakan ciri – ciri kelelahan yang dapat diamati secara visual (tanpa bantuan alat). Sedangkan karakteristik mikro hanya dapat diamati dengan menggunakan alat bantu pengelihatian berupa mikroskop.

Pada Gambar 2.10 terdapat tiga siklus umum tegangan fluktuatif yang dapat menyebabkan *fatigue* , yaitu:



Gambar 2.10 Tiga siklus tegangan *fatigue* a) Tegangan terbalik b) Tegangan berulang c) Tegangan acak

Sumber: Dieter (1986:377)

1. Tegangan Terbalik

Pada siklus tegangan ini nilai maksimum dan minimum tegangan adalah sama. Tegangan tarik dianggap positif dan tegangan tekan dianggap negatif.

2. Tegangan Berulang

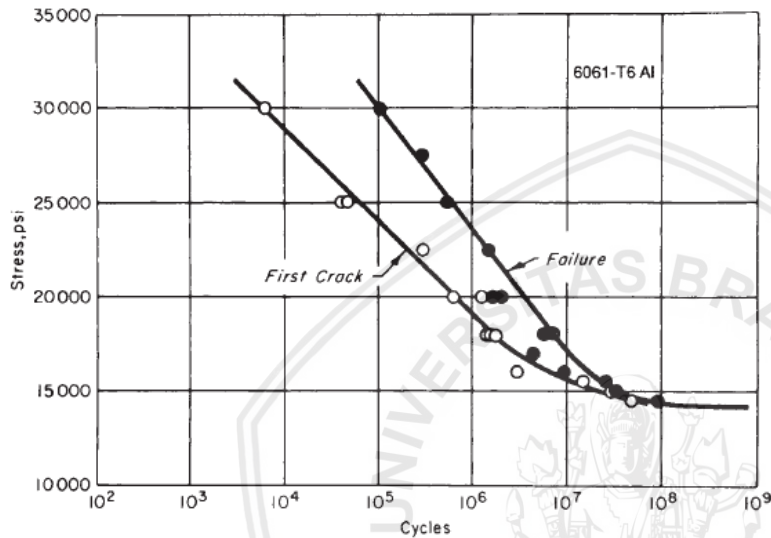
Pada siklus tegangan berulang, tegangan maksimum σ_{max} dan tegangan minimum σ_{min} tidak sama. Pada Gambar 2.6 diilustrasikan keduanya sebagai tegangan tarik, akan tetapi tidak menutup kemungkinan terjadi kesamaan pada tegangan tekan.

3. Tegangan Acak

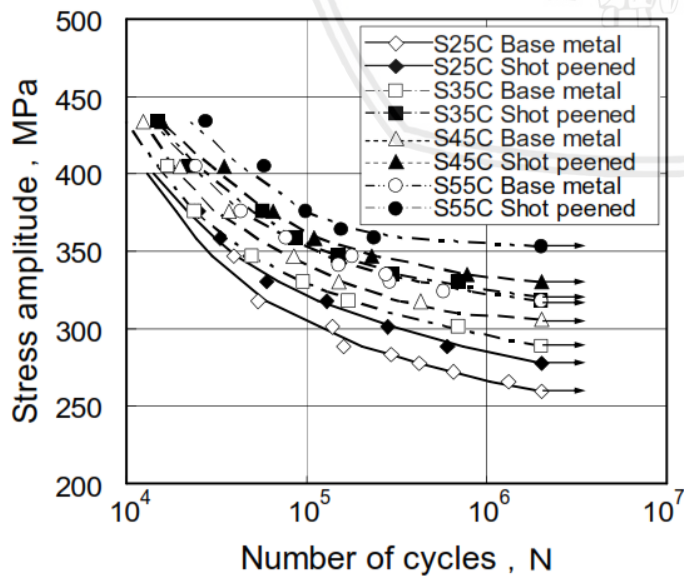
Pada siklus ini bentuk dari tegangan berulang yang terjadi sangat tidak teratur, periode dan amplitudonya dapat berubah dengan waktu.

2.6.1 Kurva S-N

Metode pengujian *fatigue* melibatkan pengujian spesimen dalam berbagai macam tegangan, biasanya penggabungan antara tarik dan bending. Hasil pengujian disajikan dalam kurva yang disebut kurva S-N ditunjukkan pada Gambar 2.10, dimana S merupakan amplitudo tegangan sedangkan N merupakan jumlah siklus. Amplitudo tegangan didefinisikan sebagai tegangan maksimum tekan dan tarik dari spesimen yang diujikan ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Kurva S-N Aluminium 6061-T6 Aluminum Alloy
Sumber: Dowling (2012:439)



Gambar 2.12 Contoh kurva S-N pada baja
Sumber: Hasegawa (1997)

Pada beberapa material, kurva *S-N* menjadi horizontal pada tegangan rendah yang menunjukkan bahwa material tidak akan mengalami kegagalan *fatigue* dengan tegangan di bawah batas tersebut. Tegangan maksimum yang dapat diberikan kepada suatu material tanpa mengalami kegagalan *fatigue*, tanpa memperhatikan jumlah siklus disebut dengan *endurance limit* atau *fatigue limit*.

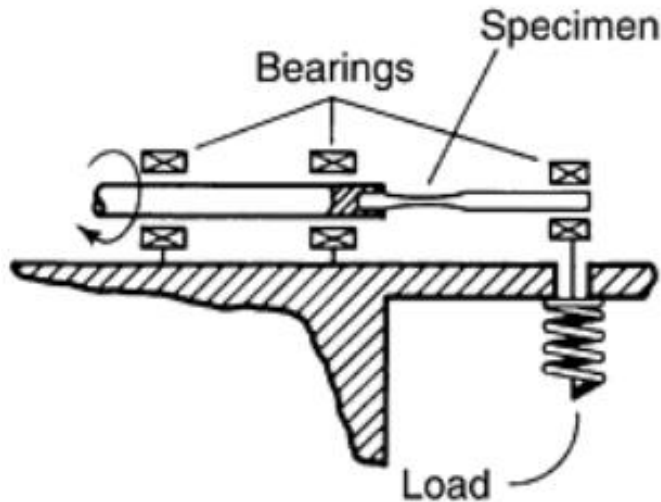
Walaupun banyak material, terutama baja, mempunyai *fatigue limit*, akan tetapi tidak dengan aluminium paduan. Pada aluminium paduan, tidak terdapat *fatigue limit* sehingga kurva *S-N* akan terus cenderung kebawah. *Fatigue limit* pada logam dapat dikaitkan dengan tegangan maksimum logam tersebut.

Prosedur untuk membuat kurva *S-N* adalah:

1. Menguji spesimen pertama dengan tegangan tinggi dimana kegagalan diharapkan terjadi pada jumlah siklus yang pendek.
2. Kemudian tegangan pada pengujian dikurangi pada tiap spesimen sampai satu atau dua spesimen tidak mengalami kegagalan pada suatu siklus tertentu.
3. Tegangan tertinggi pada spesimen yang tidak mengalami kegagalan dianggap sebagai *fatigue limit*.
4. Untuk material yang tidak memiliki *fatigue limit* pengujian biasanya dibatasi untuk pertimbangan praktis pada tegangan yang rendah dengan usia berkisar antara 10^8 atau 5×10^8 .
5. Kurva *S-N* biasanya ditentukan dengan menggunakan 5 hingga 10 spesimen. Hal tersebut akan membuat persebaran pada hasilnya, walaupun dapat digambar sebuah kurva yang halus tanpa banyak kesulitan.

2.6.2 Rotating Cantilever Bending Fatigue Tester

Rotating cantileverbending fatigue tester merupakan alat uji kekuatan lelah yang mempunyai prinsip kerja pembebanan pada spesimen uji yang berputar. Pembebanan yang diberikan pada alat ini bervariasi tergantung pada nilai kekuatan tarik suatu spesimen pengujian. Putaran yang diberikan pada spesimen pengujian adalah konstan, sehingga gaya putar dan torsi yang dikenakan pada spesimen uji tidak mempengaruhi proses pembebanan dapat dilihat pada Gambar 2.13.

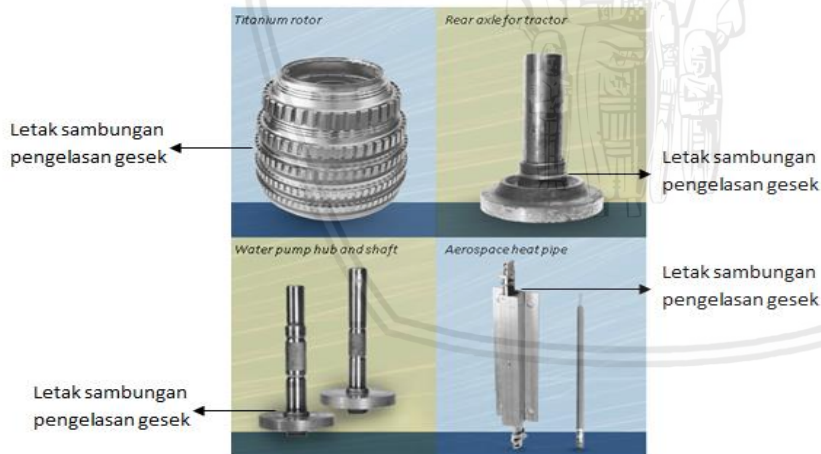


Gambar 2.13 Skema rotating cantilever bending fatigue testing machine

Sumber: ASM Handbook Mechanical Testing and Evaluation Volume 8 (2000)

2.7 Aplikasi Pengelasan Gesek

Hasil pengelasan gesek dapat diterapkan diberbagai macam bidang permesinan seperti industri pertanian, otomotif maupun militer. Pengelasan gesek tersebut dapat diterapkan pada bagian sambungan yang berbentuk silinder pejal maupun silinder berbentuk pipa. Beberapa contoh aplikasi las gesek ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Aplikasi las gesek dari paduan Al – Mg – Si

Sumber: mtiwelding (2016)

2.8 Hipotesis

Hipotesis yang terdapat pada penelitian ini adalah semakin rendah sudut *chamfer* aluminium, maka semakin tinggi nilai kekuatan lelah sambungan las geseknya. Hal ini disebabkan karena saat pengelasan sudut *chamfer* yang lebih rendah menghasilkan deformasi plastis yang lebih besar disebabkan gesekan yang terjadi lebih besar ditambah pemberian gaya tempa akhir menyebabkan ukuran butir semakin kecil sehingga ikatan

antar logam semakin kuat sehingga mempengaruhi kekuatan *ultimate* meningkat dan membuat kekuatan lelahnya meningkat.





Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB III METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah metode (*true experimental*) yaitu, nyata dan langsung pada obyek yang diteliti. Metode ini digunakan untuk mengetahui secara langsung pengaruh *BOL* dan sudut *chamfer* terhadap kekuatan lelah dari sambungan las gesek material A6061. Selain itu dilakukan kajian terhadap dasar teori yang ada dari beberapa sumber buku dan jurnal.

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada Februari 2019 – April 2019. Tempat yang digunakan pada penelitian ini adalah:

1. Kegiatan pengelasan gesek dilakukan di Laboratorium Proses Produksi I Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
2. Kegiatan pengujian kekuatan lelah dilakukan di Laboratorium Pengecoran Logam Teknik Mesin Universitas Brawijaya.

3.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini ada tiga variabel yang ditentukan yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel terkontrol.

3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang nilainya ditentukan dan tidak dipengaruhi oleh variabel lain. variabel bebas dalam penelitian ini adalah sudut *chamfer* aluminium $0^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$.

3.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang dilihat dan diukur untuk menentukan pengaruh dari variabel bebas. Adapun variabel terikat dalam penelitian ini adalah nilai dari kekuatan lelah sambungan las gesek.

3.2.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya harus tetap dijaga agar tidak mempengaruhi hasil dari variabel terikat. Variabel terkontrol dalam penelitian ini diantaranya:

1. Putaran *spindle* 1600 rpm
2. Gaya Penekanan Awal 7 kN
3. *Upset Force* 35 kN
4. *Burn Off Length* 3 mm
5. *Holding time* selama 20 detik.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

1. *Stopwatch*

Alat dalam Gambar 3.1 ini digunakan untuk mengukur waktu penekanan las gesek.



Gambar 3.1 *Stopwatch*

Sumber: Laboratorium Proses Produksi I Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

2. Jangka Sorong

Alat dalam Gambar 3.2 digunakan untuk mengukur ketebalan diameter spesimen yang akan diuji



Gambar 3.2 Jangka Sorong

Sumber: Laboratorium Metrologi Industri Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

3. Mesin Bubut

Alat pada Gambar 3.3 ini digunakan untuk membuat ukuran spesimen yang diinginkan.



Gambar 3.3 Mesin Bubut

Sumber: Laboratorium Proses Produksi I Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

4. Mesin Las *Continuous Drive Friction Welding*

Alat dalam Gambar 3.1 digunakan untuk membuat sambungan las gesek. Berikut spesifikasi mesin yang digunakan yaitu:

Merk/Type : *Lathe Machine C6232A*

Buatan : China

Tahun : 1978

Daya : 3.5 kW

Putaran *Spindle* Maksimum: 1600 rpm



Gambar 3.4 Mesin las *continuous drive friction welding*

Sumber: Laboratorium Proses Produksi I Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

5. *Rotating Cantilever Bending Fatigue Testing Machine*

Alat ini digunakan untuk menguji kekuatan lelah spesimen hasil las gesek.



Gambar 3.5 Rotating cantilever bending fatigue testing machine

Sumber: Laboratorium Proses Produksi I Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

6. *Power Hacksaw*

Alat dalam Gambar 3.1 ini digunakan untuk memotong spesimen yang dibutuhkan.



Gambar 3.6 Power Hacksaw

Sumber: Laboratorium Proses Produksi I Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

7. Kamera

Alat dalam Gambar 3.1 ini digunakan untuk mendokumentasikan hasil pengujian.



Gambar 3.7 Kamera

8. *Thermogun*

Alat dalam Gambar 3.1 digunakan untuk mengukur suhu pengelasan.



Gambar 3.8 Thermogun

3.3.2 Bahan

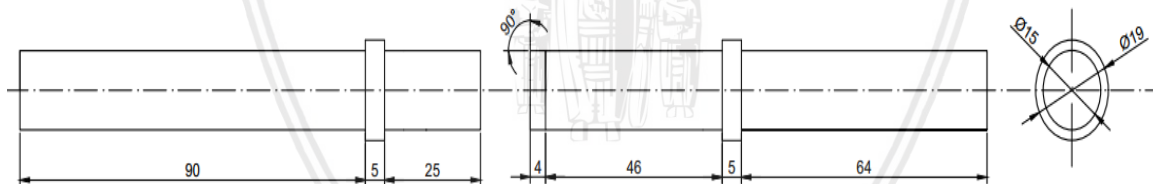
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Aluminium A6061 dengan komposisi terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1
Komposisi Kimia Aluminium A6061

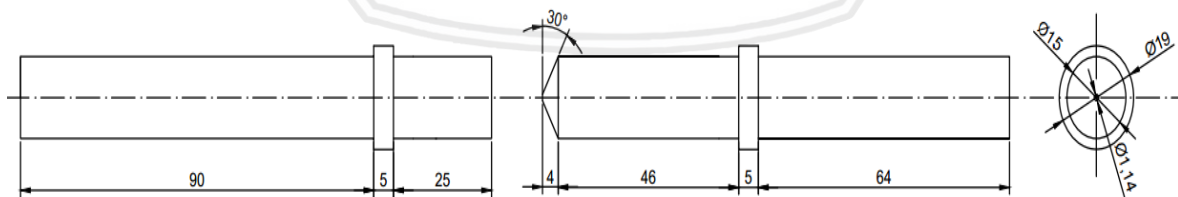
A6061	Unsur	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Lainnya
	Kadar (%)	0,652	0,272	0,171	0,020	0,808	0,065	0,024	0,024	0,018

3.3.3 Dimensi Spesimen

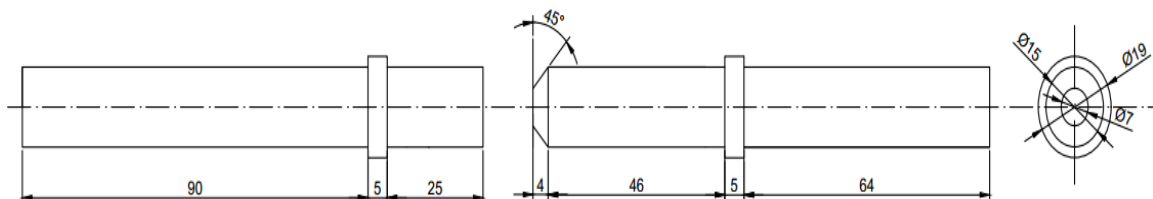
Dimensi dari spesimen yang akan diuji dalam penelitian ini dibagi menjadi dua yaitu dimensi spesimen pengelasan gesek dan spesimen uji kekuatan leleh. Masing – masing dimensi ditunjukkan pada Gambar 3.9, 3.10, 3.11.



Gambar 3.9 Dimensi spesimen dengan sudut *chamfer* 0°



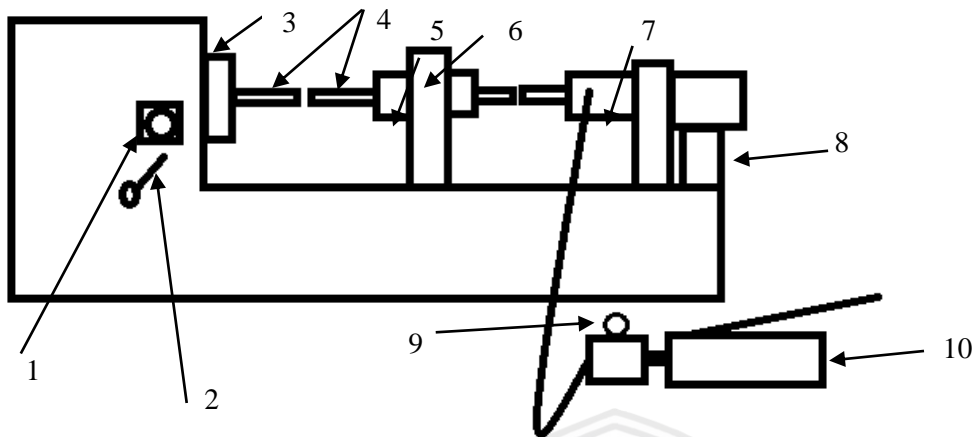
Gambar 3.10 Dimensi spesimen dengan sudut *chamfer* 30°



Gambar 3.11 Dimensi spesimen dengan sudut *chamfer* 45°

3.4 Instalasi Penelitian

3.4.1 Instalasi Mesin *Continuous Drive Friction Welding*

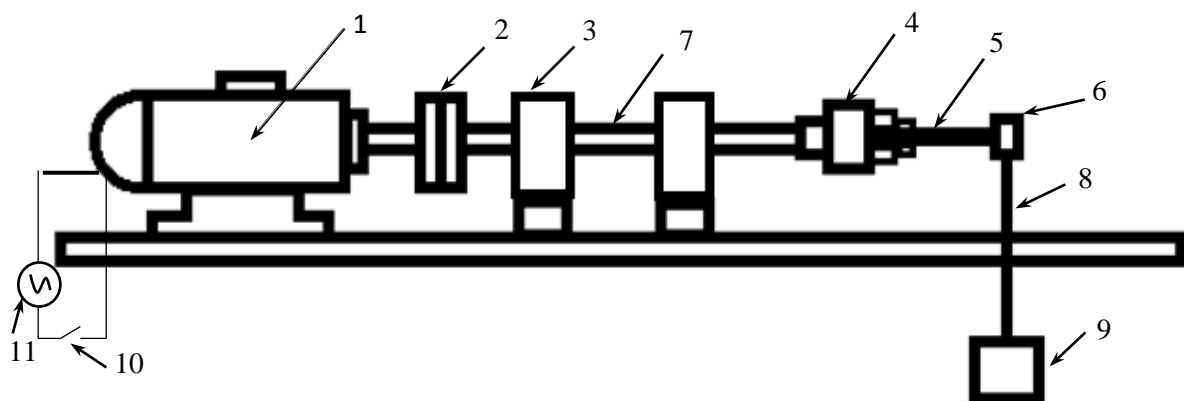


Gambar 3.12 Skema Instalasi Mesin *Continuous Drive Friction Welding*

Keterangan Gambar 3.12:

1. Tombol pengatur kecepatan *spindle*
2. Tuas *on/off* mesin bubut
3. *Chuckspindle* mesin bubut
4. Spesimen las
5. *Chuck* spesimen penekan
6. Plat penyangga *chuck* spesimen penekan
7. Silinder hidrolik
8. *Pressure gauge*
9. Pompa Hidrolik
10. *Tailstock*

3.4.2 Instalasi Alat Uji Kekuatan Lelah



Gambar 3.13 Instalasi alat uji kekuatan lelah

Keterangan Gambar 3.13:

1. Motor Listrik
2. *Flexible Coupling*
3. *Bearing*
4. *Chuck*
5. Spesimen
6. *Bearing* beban
7. Poros
8. Batang beban
9. Beban
10. Saklar
11. Sumber listrik

3.5 Prosedur Penelitian

3.5.1 Pengelasan Gesek

Proses pengelasan gesek dilakukan dengan menggunakan mesin bubut dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Mempersiapkan mesin bubut dan spesimen yang akan digunakan seperti pada skema instalasi dan dimensi spesimen sebelum di las sudah diukur.
2. Memasang spesimen(a) pada *chuck* yang berputar dan spesimen (b) *chuck* yang diam dilanjutkan *centering* antara dua spesimen tersebut.
3. Mengatur kecepatan putaran *spindle* dari motor. Kecepatan putaran yang digunakan adalah 1600 rpm.
4. Menghidupkan mesin serta mengatur tekanan pada pompa hidrolik kemudian pengelasan dilakukan dengan variasi panjang kerucut dengan diberikan gaya penekanan awal saat pengelasan sebesar 7 kN.
5. Mematikan mesin setelah *burn off length* tercapai, lalu diberi gaya penekanan akhir sebesar 35 kN dan tahan keadaan tersebut selama 20 detik.
6. Melepas spesimen dari cekam dan dilakukan pendinginan dengan media udara ruangan lalu diukur kembali panjang total spesimen setelah pengelasan.
7. Mengulangi mulai langkah nomor 2 hingga semua variasi telah dilakukan.
8. Pengelasan selesai.

3.5.2 Pengujian Kelelahan

Proses pengujian kelelahan dilakukan pada mesin *rotating cantilever bending machine*.

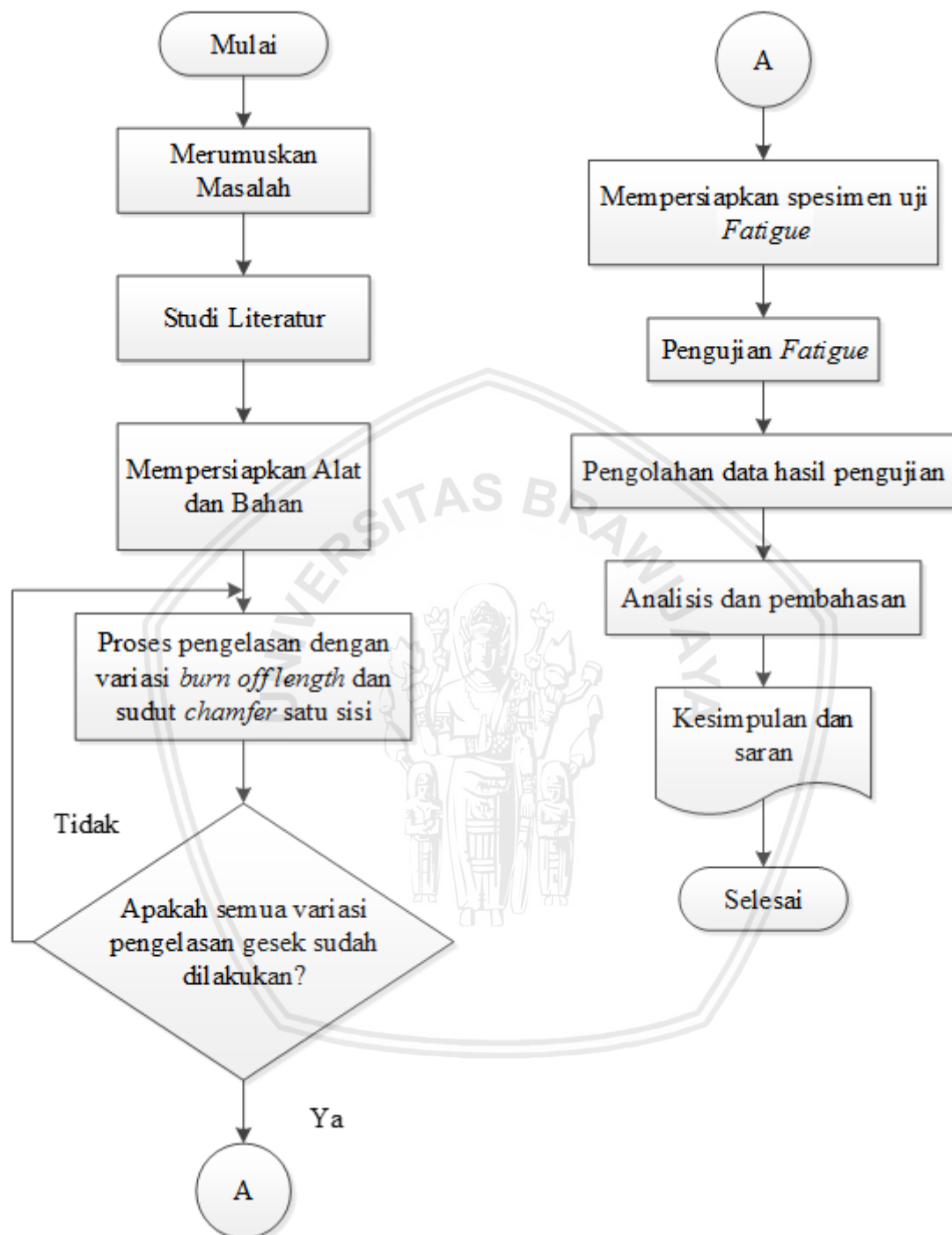
Langkah – langkah pengujian sebagai berikut.

1. Menyiapkan alat uji kelelahan.
2. Menyiapkan spesimen pengujian.
3. Melakukan pengujian dengan pembebanan 55 MPa, 44 MPa, 33 MPa, 22 MPa.
4. Membuat diagram S-N.
5. Menghitung banyaknya siklus pada masing – masing variabel.
6. Membandingkan data hasil pengujian specimen.
7. Menganalisis data.
8. Mengambil kesimpulan.



3.6 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.14 diagram alir penelitian.



Gambar 3.14 Diagram alir penelitian



Halaman ini sengaja dikosongkan



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

Dalam pengambilan data nilai kekuatan lelah dilakukan menggunakan alat uji lelah *rotating cantilever bending* dan dilakukan di Laboratorium Pengecoran Logam, Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa siklus dan waktu (detik) dibutuhkan untuk menahan beban yang diberikan ke spesimen hingga mengalami patah. Sebelum dilakukan pengujian kekuatan lelah, terlebih dahulu dilakukan pengujian tarik agar dapat dapat tegangan *yield* setiap variasi sambungan las gesek. Hasil dari kekuatan uji tarik didapat hasil kekuatan *yield* sebesar 182,145 MPa. Dengan didapatnya tegangan *yield* maka ditentukan tegangan amplitudo maksimum, yaitu 22 MPa, 33 MPa, 44 MPa, 55 MPa. Didapatnya tegangan maksimum amplitudo, maka dilakukan perhitungan beban untuk setiap variasi sudut *chamfer* dengan contoh sebagai berikut.

$$\sigma_y = 182,145 \text{ MPa}$$

$$d = 6 \text{ mm}$$

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

$$l = 9,085 + 69,95 + 5 = 84,8 \text{ mm}$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{3,14 \cdot 6^4}{64} = 63,585$$

$$M = F \cdot l$$

$$\begin{aligned} \text{a) } 50\% \sigma_y &= \sigma_{\text{bending}} \\ &= 91 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{\text{bending}} = \frac{M \cdot y}{I}$$

$$91 = \frac{M \cdot 3}{\frac{3,14(6)^4}{64}}$$

$$91 = \frac{M \cdot 3 \cdot 64}{3,14 \cdot 1296}$$

$$91 \cdot 63,585 = 64 M$$

$$M = 1930,3 \text{ Nmm}$$

$$1930,3 = F (9,085 + 69,95 + 5)$$

$$F = \frac{1930,3}{84,755}$$

$$F = 22,75 \text{ N}$$

$$= 2,3 \text{ kgf}$$

$$\text{b) } 40\% \sigma_y = \sigma_{\text{bending}}$$

$$= 73 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{\text{bending}} = \frac{M.y}{I}$$

$$73 = \frac{M.3}{\frac{3,14(6)^4}{64}}$$

$$73 = \frac{M.3.64}{3,14.1296}$$

$$73 \cdot 63,585 = 64 M$$

$$M = 1544,2 \text{ Nmm}$$

$$M = F.l$$

$$1544,2 = F (9,085 + 69,95 + 5)$$

$$F = \frac{1544,2}{84,755}$$

$$F = 18,21 \text{ N}$$

$$= 1,8 \text{ kgf}$$

$$22 = \frac{M.3}{\frac{3,14(6)^4}{64}}$$

$$22 = \frac{M.3.64}{3,14.1296}$$

$$22 \cdot 772,1 = 64 M$$

$$M = 772,1 \text{ Nmm}$$

$$M = F.l$$

$$772,1 = F (9,085 + 69,95 + 5)$$

$$F = \frac{772,1}{84,755}$$

$$F = 9,10 \text{ N}$$

$$= 0,9 \text{ kgf}$$

c) $30\% \sigma_y = \sigma_{\text{bending}}$
 $= 33 \text{ MPa}$

$$\sigma_{\text{bending}} = \frac{M.y}{I}$$

$$33 = \frac{M.3}{\frac{3,14(6)^4}{64}}$$

$$33 = \frac{M.3.64}{3,14.1296}$$

$$33 \cdot 1158,2 = 64 M$$

$$M = 1158,2 \text{ Nmm}$$

$$M = F.l$$

$$1158,2 = F (9,085 + 69,95 + 5)$$

$$F = \frac{1158,2}{84,755}$$

$$F = 13,66 \text{ N}$$

$$= 1,4 \text{ kgf}$$

d) $20\% \sigma_y = \sigma_{\text{bending}}$
 $= 22 \text{ MPa}$

$$\sigma_{\text{bending}} = \frac{M.y}{I}$$



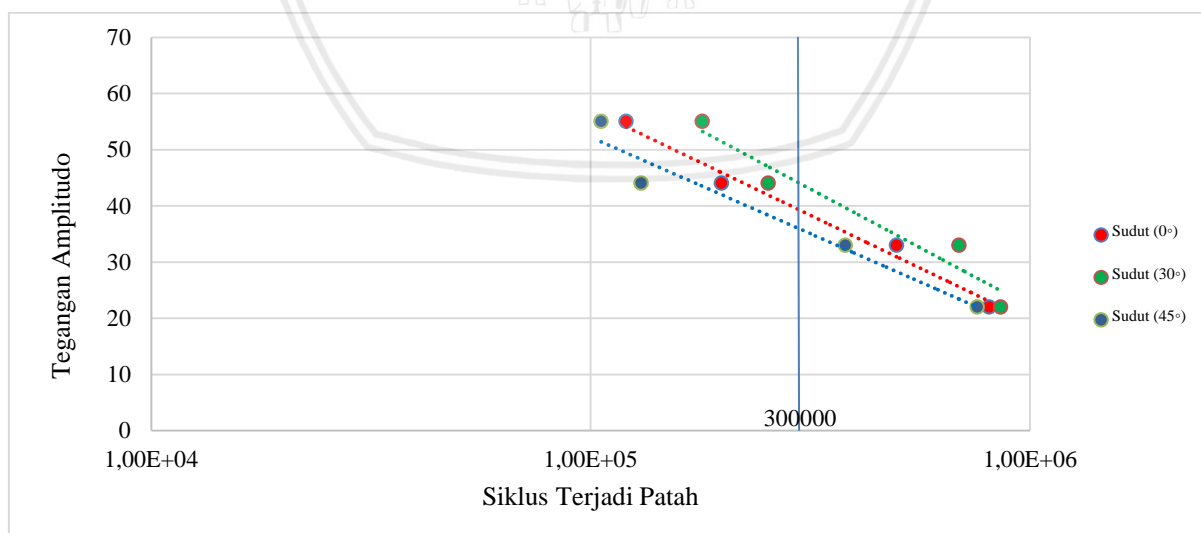
Setelah proses permesinan untuk pembuatan hasil pengelasan menjadi bentuk spesimen uji lelah. Data diambil dengan variasi sudut *chamfer* 0° , 30° , 45° dengan *burn-off length* 3 mm serta dengan pembebanan dari empat titik tegangan *bending* maksimum sebesar 22 MPa, 33 MPa, 44 MPa, dan 55 MPa. Spesimen yang digunakan adalah aluminium a6061, dengan bentuk dan ukuran spesimen yang berbeda. Data hasil pengujian lelah dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1
Data Hasil Uji Lelah (*Fatigue*)

Sudut Chamfer ($^\circ$)	Tegangan Amplitudo Maksimum (MPa)	Beban (kilogram)	Putaran Motor (rpm)	Lama Patah (menit)	Siklus (putaran)
0°	55	2,3	988	122	120.536
	44	1,8	988	201	198.588
	33	1,4	988	504	497.952
	22	0,9	988	818	808.184
30°	55	2,3	988	182	179.816
	44	1,8	988	257	253.916
	33	1,4	988	698	689.614
	22	0,9	988	869	858,572
45°	55	1163	1400	144,217	201.903
	44	775	1400	230,85	323.190
	33	387	1400	326,283	57.776
	22	1163	1400	108,57	151.993

4.2 Pembahasan

4.2.1 Diagram S-N Kekuatan Lelah



Gambar 4.1 Diagram S-N uji kekuatan lelah tiap variasi sudut *chamfer* aluminium A6061

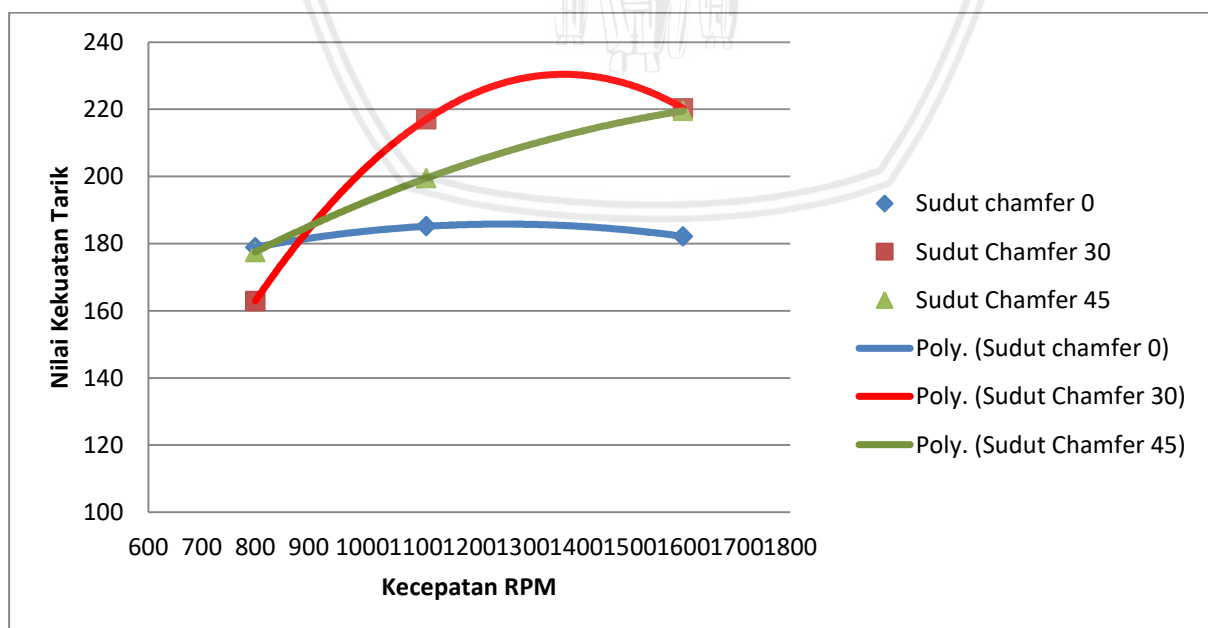
Setelah pengujian dilakukan dan didapat data siklus dan waktu (menit), kemudian data dimasukkan kedalam bentuk diagram agar terlihat kurva S-N pengujian kekuatan lelah

setiap variasi dan dengan mudah menganalisa hasil dari pengujian tersebut. Grafik dari uji kekuatan lelah ditunjukkan Gambar 4.1.

Diagram S-N diatas dapat dilihat hubungan pengaruh variasi sudut *chamfer* terhadap kekuatan lelah sambungan las aluminium a6061. Pada sudut *chamfer* 30° dengan pembebanan 22 MPa merupakan siklus yang terpanjang, yaitu 858.572 siklus dan membutuhkan waktu 869 menit untuk terjadinya patahan dalam pengujian kekuatan lelah pada spesimen. Sedangkan untuk sudut *chamfer* 45° dengan pembebanan 55 MPa merupakan siklus yang terpendek, yaitu 105.716 siklus dan membutuhkan waktu 107 menit untuk terjadinya patahan dalam pengujian. Pada pengujian sudut *chamfer* 0° merupakan pengujian yang terjadinya patahan pada spesimen diantara siklus terpanjang dan terpendek dari tiap variasi sudut *chamfer* dan pembebanan spesimen. Hal ini dipengaruhi hasil dari kekuatan tarik aluminium a6061 pada setiap variasi sudut *chamfer*.

4.2.2 Diagram Kekuatan Tarik

Diagram kekuatan tarik menunjukkan bahwa semakin kecil sudut *chamfer* kekuatan tarik semakin tinggi. Hal ini dikarenakan pada sudut *chamfer* yang kecil mempunyai tingkat deformasi plastis yang tinggi menyebabkan terjadinya dislokasi yang terpusat dan bentuk butir yang lebih kecil dan rapat akibat dari penambahan tekanan. Bentuk butir yang kecil dan rapat membuat kekuatan *ultimate* menjadi naik dan membuat kekuatan lelahnya juga meningkat. Gambar 4.2 dibawah dapat dilihat kekuatan tarik berikut.



Gambar 4.2 Hubungan kekuatan tarik terhadap sudut *chamfer*

4.2.3 Bentuk Patahan

4.2.3.1 Foto Makro



Gambar 4.3 Foto makro sudut *chamfer* 0°



Gambar 4.4 Foto makro sudut *chamfer* 30°

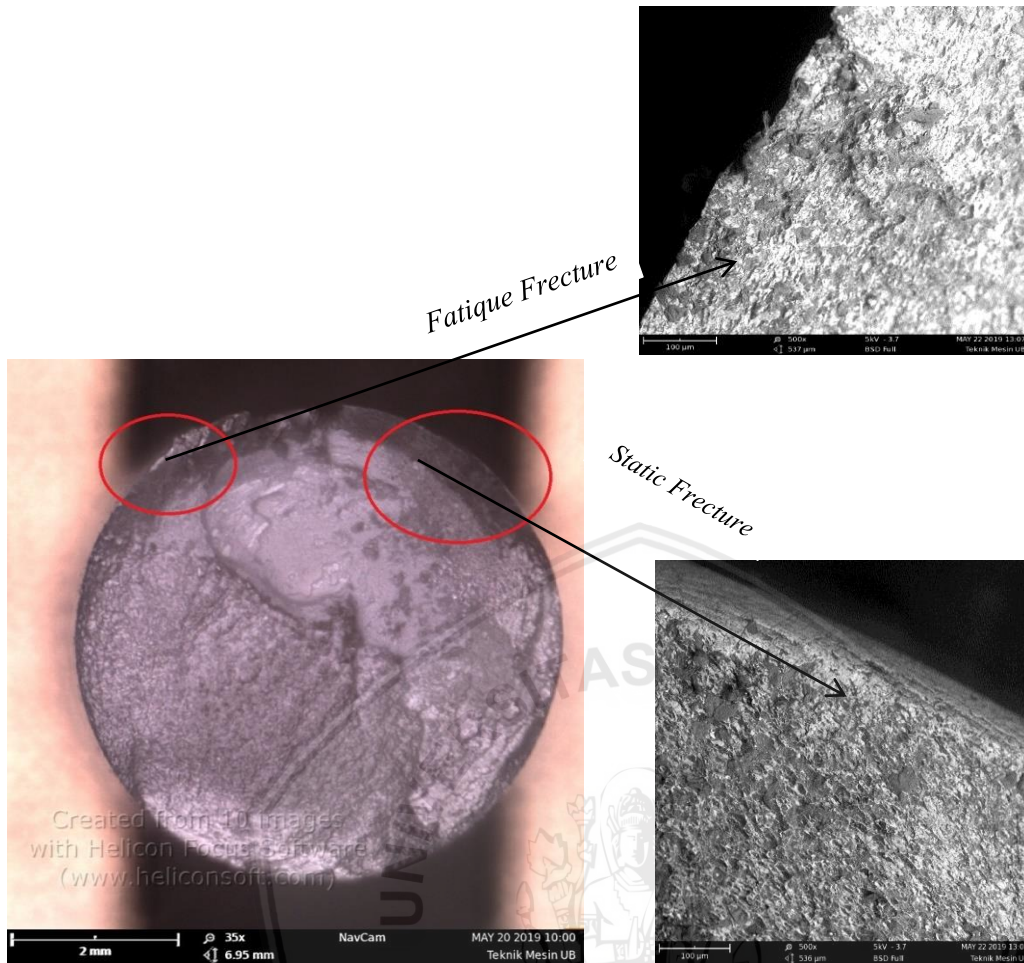


Gambar 4.5 Foto makro sudut *chamfer* 45°

Gambar 4.3, 4.4, 4.5 menunjukkan foto makro bentuk patahan dari variasi spesimen sudut *chamfer* yang telah dilakukan pengujian.

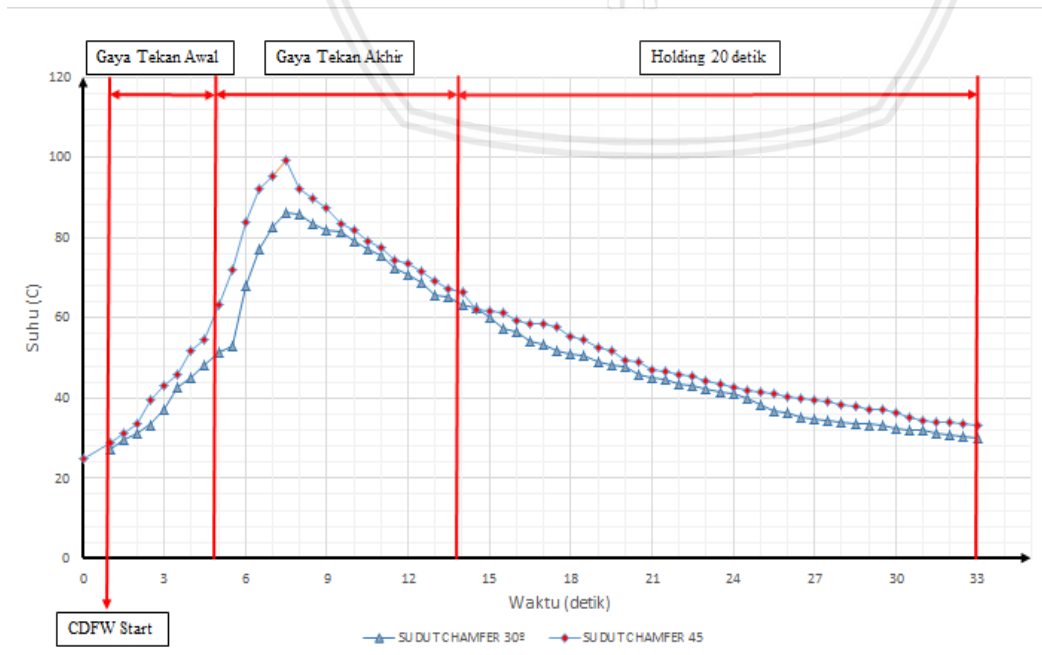
4.2.3.2 Uji *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Pengujian kekuatan lelah terdapat dua area patahan yaitu *fatigue fracture* dan *static fracture* dapat dilihat pada Gambar 4.6 diatas. Luas area patahan yang merupakan awal terjadi penjalaran retakan yang secara makro terlihat garis-garis disebut *fatigue fracture*, yang juga dapat dilihat secara makro memiliki permukaan lebih terang relatif halus. Sedangkan *static fracture* adalah retakan yang menjalar sehingga mengakibatkan penampang yang tersisa tidak mampu lagi menahan beban sehingga mengakibatkan patahan.



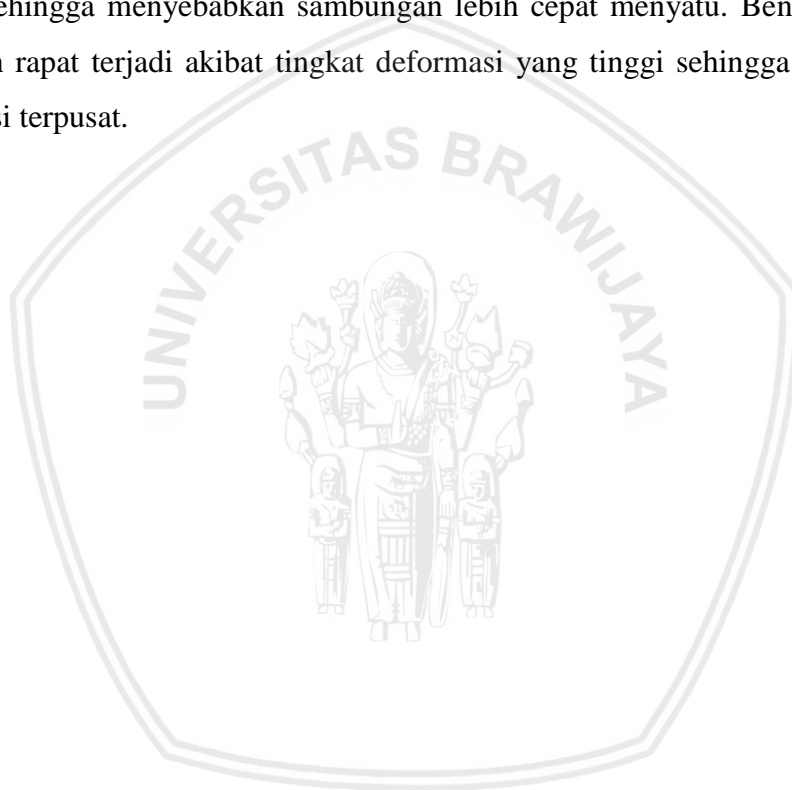
Gambar 4.6 Bentuk patahan hasil kekuatan uji lelah Aluminium A6061 (SEM)

4.2.3 Diagram Suhu Pengelasan



Gambar 4.7 Diagram suhu pengelasan aluminium A6061 variasi sudut chamfer

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa sebelum dilakukannya pengelasan suhu pada sudut *chamfer* 45° masih berada di suhu 27° , setelah diberikan gaya penekanan awal mengakibatkan gesekan dan spesimen bersatu yang menimbulkan panas hingga 98° . Setelah *burn-off length* yang sudah ditentukan 3 mm tercapai, kemudian mesin dimatikan dan dilakukan holding selama 20 detik dengan media udara sehingga suhu spesimen kembali menurun hingga normal. Grafik diatas juga menunjukkan suhu pengelasan aluminium a6061 variasi sudut *chamfer* yang menunjukkan bahwa spesimen dengan variasi sudut *chamfer* 45° memiliki suhu pengelasan yang lebih tinggi daripada spesimen dengan variasi sudut 30° yang menyebabkan spesimen dengan variasi sudut *chamfer* 45° lebih cepat terdeformasi sehingga menyebabkan sambungan lebih cepat menyatu. Bentuk butir yang lebih kecil dan rapat terjadi akibat tingkat deformasi yang tinggi sehingga menyebabkan terjadi dislokasi terpusat.





Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini didapat kesimpulan bahwa sudut *chamfer* dapat mempengaruhi kekuatan lelah sambungan las gesek aluminium a6061. Siklus terpanjang terjadi pada sudut *chamfer* 30° yang mempunyai siklus 858.572 dengan pembebanan 22 MPa, sedangkan untuk siklus terpendek terjadi pada sudut *chamfer* 45° yang mempunyai siklus 105.716 dengan pembebanan 55 MPa. Sedangkan untuk kekuatan uji tariknya tertinggi pada sudut *chamfer* 30° dan yang terendah pada sudut *chamfer* 45°. Sehingga dapat disimpulkan dari pengujian ini bahwa semakin kecil sudut *chamfer* spesimen maka kekuatan lelahnya juga semakin meningkat dan membutuhkan siklus yang lebih panjang untuk terjadinya patahan pada spesimen pengujian.

5.2 Saran

1. Diperlukan mikroskop digital agar terlihat retakan awal pada spesimen pada saat pengujian kekuatan lelah.
2. Diperlukan perawatan mesin pengelasan maupun mesin kekuatan uji lelah yang lebih terjadwal agar tidak terjadi masalah pada saat pengujian berlangsung.
3. Diperlukan penelitian yang lebih lanjut untuk parameter yang berbeda agar kedepannya untuk parameter las gesek dapat lebih baik untuk meningkatkan kekuatan lelah sambungan.



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- American Society for Testing and Material. 2004. *Standard Test Method for Torsion at Room Temperature, ASTM Designation E143*. Annual Book of ASTM Standard. Vol 03.01. pp. 338-342.
- American Welding Society, 2007, *Standard Methods For Mechanical Testing of Weld*, AWS, B4.0.:2007.
- ASM Handbook Volume 6. 1993. *Welding. Brazing and Soldering*. ASM Handbook Committee. United State.
- ASM Handbook Volume 8. 2000. *Mechanical Testing and Evaluation. Material Park. OH*. ASM International.
- ASM Handbook, 2000, *Introduction to Aluminium Alloys and Tempers*, ASM International.
- Avner, S.H., 1964, *Introduction to Physical Metallurgy*. 1st Edition. McGrawHill Book.
- Bhamji, I., Preuss, M., Philip L., Threadgill., Addison, A. 2011. *Solid state joining of metal by linear friction stir*. *Materials Science & Technology*. 27 (1) : 2-12.
- Dieter, George. 1986. *Mechanical Metallurgy*. Maryland. McGraw Hill Book.
- Djadmiko R.D. 2008. *Teori Fabrikasi 2*. Diktat Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Yogyakarta
- Dowling, Norman E. 2012. *Mechanical Behavior of Materials Engineering Method for Deformation. Fracture. and Fatigue Fourth Edition*. London. Pearson International.
- Hasegawa, M., Suzuki, H., 1997. *Influence of Shot Peening on Fatigue Strength of Friction Welded Joint*. *Journal of The Japan Welding Society*. Vol 25. No. 2: 381-385.
- Irawan, Yudy Surya, Eko Budi Santoso, Endi Sutikno. 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.3, No.1 pp 293-298.
- Iswar. M & Syam. R. 2012 *Pengaruh Variasi Parameter pengelasan (Putaran dan Temperatur) Terhadap Kekuatan Sambungan Las Friction Welding Pada Baja KarbonRendah*. Jurnal. Jurusan Teknik Mesin Universitas Hasanuddin.
- Kalle, S. dan Nicholas, D 1999 *Friction and Forge Welding Processes for The Automotive Industry*, International Body Engineering Conference. Detroit.
- Khairuddin, Jauhari Tahir., Jamaluddin Abdullah, Zuhailawati Hussain and Indra Putra Almanar. 2012. *Principles and Thermo – Mechanical Model of Friction Stir Welding. Welding Processes*. School of Mechanical Engineering, Universiti Sains Malaysia, Nibong Tebal, Penang. Malaysia.
- Polmear, I.J., 1995. *Light Alloys: Metallurgy of The Light Metals*. Arnold Press. London. England.

- Sahin, M., Misirli, C. 2012. *Mechanical and Metalurgical Properties of Friction Welded Aluminium Joints*. Department. Of Mechanical Eng., Trakya University, pp. 277-300.
- Satoto & Husodo. 2002 *Analisa Pengaruh Tekanan Tempa Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja st 41 (diameter 14 mm dan pelat baja 50 mm) dengan Metode Direct-drive Friction Welding Sebagai Alternatif Pembuatan Front Spring Pin t-120*. jurnal. Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.
- Surdia, T., Saito, S. 1999, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Cetakan ke-4, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.

