

**PENGARUH VARIASI SUDUT *CHAMFER* TERHADAP KUALITAS
SAMBUNGAN HASIL PENGELASAN GESEK (*FRICTION WELDING*)
MAGNESIUM AZ-31B**

(Skripsi)

Oleh

NOUVAL FERDOUZA

1715021010



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2023

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI SUDUT *CHAMFER* TERHADAP KUALITAS SAMBUNGAN HASIL PENGELASAN GESEK (*FRICTION WELDING*) MAGNESIUM AZ-31B

Oleh

NOUVAL FERDOUZA

Pengelasan gesek (*friction welding*) merupakan salah satu diantara pengelasan jenis *solid-state welding*. Pengelasan gesek adalah proses penyambungan yang aplikasinya meleburkan material itu sendiri dengan menggunakan panas yang dihasilkan antara permukaan melalui kombinasi gerakan rotasi dan penerapan beban tekan. Penggunaan paduan magnesium banyak digunakan di berbagai bidang industri, contoh aplikasi paduan magnesium diantaranya adalah untuk melapisi bahan dari besi dan baja sebagai sarana pelindung terhadap korosi. Penggunaan paduan magnesium seri AZ-31B mempunyai kekuatan spesifik yang tinggi dibandingkan dengan seri lain seperti AM.

Tujuan dari dilaksanakannya penelitian tugas akhir ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan sudut *chamfer* terhadap nilai kekuatan tarik dan struktur mikro pada hasil las gesek magnesium AZ-31B. Dari penelitian ini diperoleh hasil pada pengujian tarik yaitu dengan penambahan sudut *chamfer* terhadap permukaan spesimen las akan meningkatkan nilai kekuatan tariknya. Didapatkan nilai tegangan maksimum tertinggi yaitu pada variasi sudut *chamfer* 30⁰ dengan rata-rata sebesar 228,525 MPa dan yang memiliki nilai tegangan maksimum terendah yaitu pada material yang tidak menggunakan variasi sudut *chamfer* dengan rata-rata sebesar 105,722 MPa. Berdasarkan pengujian struktur mikro menunjukkan perbedaan butiran fasa α -Mg dan β -Mg₁₇Al₁₂ pada setiap daerahnya, hal ini dipengaruhi oleh panas dan juga pencairan yang dihasilkan dari pengelasan sehingga mengubah struktur mikronya.

Kata kunci : pengelasan gesek, magnesium AZ-31B, uji visual, uji tarik, struktur mikro

ABSTRACT

THE EFFECT OF CHAMFER ANGLE VARIATION ON FRICTION WELDING QUALITY OF MAGNESIUM AZ-31B

By

NOUVAL FERDOUZA

Friction welding is one of the solid-state welding types. Friction welding is a joining process whose application melts the material itself by using the heat generated between the surfaces through a combination of rotational motion and the application of compressive loads. The use of magnesium alloys is widely used in various industrial fields, examples of magnesium alloy applications include coating materials from iron and steel as a means of protecting against corrosion. The use of AZ-31B series magnesium alloys has a high specific strength compared to other series such as AM.

The purpose of this final project research is to determine the effect of the addition of chamfer angle on the tensile strength value and microstructure of magnesium AZ-31B friction welding results. From this research, the results obtained in tensile testing are that the addition of the chamfer angle to the surface of the welding specimen will increase the tensile strength value. The highest maximum stress value was obtained in the 30⁰ chamfer angle variation with an average of 228.525 MPa and the lowest maximum stress value was in the material that did not use the chamfer angle variation with an average of 105.722 MPa. Based on microstructure testing, it shows differences in α -Mg and β -Mg₁₇Al₁₂ phase grains in each region, this is effected by heat and also the melting generated from welding so that it changes its microstructure.

Keywords: friction welding, magnesium AZ-31B, visual test, tensile test, microstructure

**PENGARUH VARIASI SUDUT *CHAMFER* TERHADAP KUALITAS
SAMBUNGAN HASIL PENGELASAN GESEK (*FRICTION WELDING*)
MAGNESIUM AZ-31B**

Oleh:

NOUVAL FERDOUZA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2023

Judul Skripsi

**PENGARUH VARIASI SUDUT CHAMFER
TERHADAP KUALITAS SAMBUNGAN
HASIL PENGELASAN GESEK (FRICTION
WELDING) MAGNESIUM AZ-31B**

Nama Mahasiswa

Nouval Ferdouza

Nomor Pokok Mahasiswa

1715021010

Jurusan

Teknik Mesin

Fakultas

Teknik



Komisi Pembimbing 1

Komisi Pembimbing 2

Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU.
NIP. 197008122001121001

Ir. Tarkono, S.T., M.T., IPP.
NIP. 197004151998021001

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi
S1 Teknik Mesin

Dr. Amrul, S.T., M.T.
NIP 19710331 199903 1 003

Novri Tanti, S.T., M.T.
NIP 19701104 199703 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua Penguji : **Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU.**



Anggota Penguji : **Ir. Tarkono, S.T., M.T., IPP.**



Penguji Utama : **Hanowo Supriadi, S.T., M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **5 September 2023**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

SKRIPSI INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 36 PERATURAN
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN
REKTOR NO.13 TAHUN 2019.

YANG MEMBUAT PERNYATAAN



NOUVAL FERDOUZA

NPM 1715021010

RIWAYAT HIDUP

Bernama lengkap Nouval Ferdouza, penulis adalah anak kedua dari pasangan Bapak Hozinudin dan Ibu Umayah yang lahir di Cilegon, tanggal 09 Februari 1999. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SDN Jerang Ilir pada tahun (2005-2011), pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Cilegon pada tahun (2011-2014), pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMAN 1 Cilegon pada tahun (2014-2017).

Penulis pada tahun 2017 mengikuti seleksi SNMPTN dan diterima pada Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Selama masa perkuliahan, penulisan aktif sebagai Anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) divisi Dana dan Usaha periode 2018-2019 dan menjadi anggota divisi Koinfo HIMATEM Periode 2019-2020.

Pada tahun 2023 penulis menyelesaikan skripsi berjudul “Pengaruh Variasi Sudut *Chamfer* Terhadap Kualitas Sambungan Hasil Pengelasan Gesek (*Friction Welding*) Magnesium AZ-31B” sebagai syarat memperoleh gelar sarjana Teknik Mesin dengan bimbingan Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU. dan Bapak Ir. Tarkono, S.T., M.T., IPP.

MOTTO

Wahai orang-orang yang beriman, jadikanlah sabar dan shalat sebagai penolongmu. Sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar.

“QS Al-Baqarah: 153”

Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi (pula) kamu menyukai sesuatu, padahal ia amat buruk bagimu; Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui

“QS Al-Baqarah: 216”

Sesungguhnya shalatku, ibadahku, hidupku dan matiku hanyalah untuk Allah
tuhan seluruh alam

“QS Al-An’am: 162”

PERSEMBAHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim

Dengan menyebut nama Allah yang Maha Pengasih, Maha Penyayang.
Alhamdulillahirabbil'alamin, berhimpun syukur kepada Sang Maha Kuasa.
Dengan segala kerendahan hati karya ini kupersembahkan sebagai rasa syukur dan
tanda baktiku kepada:

Orang Tuaku Tercinta Bapak Hozinudin dan Ibu Umayah

Yang sudah membesarkanku dengan tulus, selalu memberi motivasi, mendoakan,
bekerja keras tak kenal lelah dan menasihatiku demi tercapainya cita-cita.

Terimakasih atas kesabaran yang tak terbatas untukku.

Kakak ku Tersayang Alvin Adam

Yang telah menyemangatiku dan selalu memberi dukungan dalam meraih
kesuksesan, agar kelak menjadi lebih baik dan bermanfaat bagi orang lain.

Sahabatku Terbaik Rekan Teknik Mesin angkatan 2017

Terima kasih atas segala nasehat dan sudah menjadi bagian cerita suka cita
perjalanan hidupku dalam perjalanan panjang nan melelahkan.

Semua Guru, Dosen dan Almamater Tercinta Universitas Lampung

Terima kasih pak bu jasmu atas segala nasehat, dan sudah mengajarkan banyak
hal kepadaku.

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Alhamdulillahirabbil'alamin, Segala puji dan rasa syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunianya dan tak lupa pula shalawat serta salam selalu tercurah kepada junjungan Nabi Muhammad SAW, sahabatnya, serta pengikutnya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan laporan Tugas Akhir yang berjudul “Pengaruh Variasi Sudut *Chamfer* Terhadap Kualitas Sambungan Hasil Pengelasan Gesek (*Friction Welding*) Magnesium AZ-31B” dengan sebaikbaiknya, sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis mendapatkan banyak bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak. Oleh karena itu penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Ibuku Umayah dan Bapakku Hozinudin, S.E. yang tidak pernah henti-hentinya memberikan dukungan moral dan materilnya serta doa dan kasih sayang yang diberikan.
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung dan serta selaku Pembimbing Akademik.
4. Ibu Novri tanti, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.
5. Prof. Ir. Irza Sukmana, S.T., M.T., Ph.D., IPU. selaku Dosen Pembimbing Pertama tugas akhir ini, yang telah memberikan bimbingan, ide pikiran dan saran sehingga terselesaikannya skripsi ini.

6. Ir. Tarkono, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Kedua, yang telah memberikan berbagai masukan dan saran sehingga terselesaikannya skripsi ini.
7. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T., selaku Pembahas, yang telah memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
8. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan.
9. Staf Akademik serta Asisten Laboratorium yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Rekan-rekan terdekat Elvandho, Nabil, Dicky, Indra, Iwang, Erry, Bayu, Abim dan Grup Rafandria Kos yang telah memberikan dukungan semangat serta masukan dalam pelaksanaan tugas akhir.
11. Keluarga Besar Teknik Mesin angkatan 2017 yang senantiasa memberikan dukungan.
12. Dan semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini tidak luput dari kekurangan dan kesalahan. Oleh karena itu penulis secara pribadi memohon maaf atas kekurangan dan kesalahan tersebut. Penulis berharap laporan Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb.

Bandar Lampung, 05 September 2023

Penulis,

NOUVAL FERDOUZA

NPM 1715021010

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	vi
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Tujuan Penelitian	4
C. Batasan Masalah	4
D. Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Pengelasan.....	6
B. Pengelasan Kondisi Cair (<i>Liquid State Welding</i>).....	8
C. Pengelasan Kondisi Padat (<i>Solid State Welding</i>).....	11
D. Pengelasan Gesek (<i>Friction Welding</i>)	13
E. Kelebihan dan Kekurangan Pengelasan Gesek.....	18
F. Magnesium.....	19
G. Pengujian Visual	21
H. Pengujian Tarik.....	22
I. Pengujian Struktur Mikro	25
III. METODOLOGI PENELITIAN	26
A. Tempat dan Waktu Penelitian	26
B. Alat dan Bahan.....	27
C. Pelaksanaan Penelitian.....	30
D. Diagram Alir	35
E. Pengambilan Data	36
IV. DATA DAN PEMBAHASAN	39
A. Analisa Visual Hasil Pengelasan Gesek	39
B. Analisa Uji Tarik.....	42

C. Analisa Uji Metalografi	55
V. PENUTUP.....	60
A. Simpulan	60
B. Saran	61

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Komposisi Magnesium AZ-31B	27
2. Parameter percobaan pengelasan gesek	30
3. Dimensi Spesimen Uji Tarik Standar ASTM E8	33
4. Data Tegangan Luluh Uji Tarik	36
5. Data Tegangan Maksimum Uji Tarik	36
6. Data Modulus Elastisitas Uji Tarik	37
7. Data Struktur Mikro	37
8. Dimensi Spesimen Uji Tarik Standar ASTM E8	42
9. Bentuk spesimen setelah uji tarik.....	43
10. Data Hasil Tegangan Luluh Uji Tarik.....	50
11. Data Hasil Tegangan Maksimum Uji Tarik	51
12. Data Hasil Modulus Elastisitas Uji Tarik	51
13. Data Hasil Uji Tarik.....	53
14. Data Hasil Struktur Mikro	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Klasifikasi cara pengelasan.....	7
2. Prinsip kerja <i>projection welding</i>	9
3. Jenis elektroda.....	10
4. Prinsip kerja las tempa	13
5. Prinsip kerja pengelasan gesek (<i>friction welding</i>)	14
6. Daerah pengelasan gesek	15
7. Skema pengelasan gesek.....	16
8. Penamaan paduan magnesium	21
9. Spesimen sebelum dan sesudah pengujian tarik	23
10. Kurva tegangan dan regangan uji tarik	23
11. Magnesium AZ-31B	27
12. Sketsa alat las gesek.....	28
13. Mesin las gesek	28
14. Mesin uji tarik	29
15. Mikroskop optik.....	29
16. Spesimen dengan sudut <i>chamfer</i>	31
17. Spesimen uji tarik standar ASTM E-8	32
18. Diagram alir	35
19. Hasil pengelasan gesek tanpa sudut <i>chamfer</i>	38
20. Hasil pengelasan gesek variasi sudut <i>chamfer</i> 15 ⁰	39
21. Hasil pengelasan gesek variasi sudut <i>chamfer</i> 30 ⁰	40
22. Hasil pengelasan gesek variasi sudut <i>chamfer</i> 45 ⁰	41
23. Spesimen uji tarik standar ASTM E-8	42

24. Bentuk spesimen uji tarik.....	43
25. Perbandingan grafik tegangan regangan spesimen 1 dan 2	46
26. Perbandingan grafik tegangan regangan spesimen 3 dan 4	47
27. Perbandingan grafik tegangan regangan spesimen 5 dan 6	48
28. Perbandingan grafik tegangan regangan spesimen 7 dan 8	49
29. Struktur mikro daerah <i>base metal</i> dan HAZ magnesium AZ-31B	55
30. Struktur mikro daerah lasan magnesium AZ-31B	57

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pengelasan merupakan metode penyambungan dua buah logam dengan cara memanaskan dan melelehkan logam yang akan disambung hingga mencapai titik leburnya (Prabowo, dkk, 2017). Teknologi pengelasan saat ini banyak digunakan di berbagai aplikasi dalam dunia industri dari yang sederhana sampai yang kompleks. Beberapa contoh aplikasi sederhana dari proses pengelasan yaitu pembuatan peralatan rumah tangga, tralis, meja besi, dan lainnya, kemudian untuk contoh yang lebih kompleks seperti pengelasan pada komponen perkapalan, robotika dan industri otomotif.

Dalam ruang lingkup industri modern, secara umum proses pengelasan diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu: pengelasan dengan proses peleburan (*fusion welding*) dan pengelasan tanpa proses peleburan atau dalam kondisi padat (*solid-state welding*) (Solihin, dkk, 2017). Karena pengelasan memegang peranan utama dalam rekayasa dan produksi logam, oleh sebab itu pengelasan merupakan bagian yang tak terpisahkan dari peningkatan dan pertumbuhan industri.

Pengelasan dengan elektroda terbungkus telah tersebar luas di kalangan masyarakat. Pengelasan elektroda terbungkus sangat cocok digunakan untuk mengelas plat-plat dengan permukaan yang datar. Untuk benda pejal menggunakan pengelasan elektroda terbungkus sangat tidak disarankan karena akan sangat sulit untuk dilakukan, selain itu jika digunakan untuk

mengelas benda pejal maka hasilnya akan kurang baik (Firmansyah, dkk, 2018). Salah satu alternatif untuk mengelas benda pejal adalah dengan menggunakan pengelasan gesek (*friction welding*).

Pengelasan gesek (*friction welding*) merupakan salah satu diantara pengelasan jenis *solid-state welding*, dimana yang membedakan dengan jenis pengelasan lebur (*fusion welding*) adalah pada *solid-state welding* tidak menggunakan bahan tambah (*filler*) untuk memfasilitasi proses pengelasannya. Maka dari itu pengelasan gesek merupakan salah satu solusi yang dilakukan untuk mengatasi proses penyambungan logam yang sulit dilakukan dengan pengelasan lebur (*fusion welding*).

Pengelasan gesek adalah proses penyambungan yang aplikasinya meleburkan material itu sendiri dengan menggunakan panas yang dihasilkan antara permukaan melalui kombinasi gerakan rotasi dan penerapan beban tekan (Sakura, dkk, 2017). Pengelasan gesek memanfaatkan gerakan gesekan tersebut untuk menghasilkan panas sehingga menyebabkan dua buah logam menyatu. Beberapa keuntungan yang dimiliki pengelasan gesek dibandingkan dengan pengelasan cair yaitu hasil pengelasan yang lebih baik karena tidak adanya fluks yang dihasilkan, waktu penyambungan antar material relatif cepat dan juga dapat menyambungkan material yang berbentuk bulat maupun tidak bulat. Secara umum, dalam proses pengelasan gesek akan menghasilkan struktur las seperti: logam dasar (*base metal, BM*), daerah terpengaruh panas (*heat affected zone, HAZ*) dan daerah las (*weld zone, WZ*) atau juga diidentifikasi sebagai daerah putaran (*stir zone, SZ*).

Parameter penting yang perlu diperhatikan pada pengelasan gesek yaitu waktu gesekan, tekanan gesek, kecepatan rotasi, waktu tempa dan tekanan tempa. Ketepatan pemilihan parameter tersebut yang akan menentukan kualitas dari hasil pengelasan gesek itu sendiri (Solihin, dkk, 2017). Untuk meningkatkan kualitas sambungan hasil las gesek salah satunya adalah kekuatan tarik. Dalam penelitian yang berjudul Pengaruh Sudut *Chamfer*

terhadap Kekuatan Tarik dan Impak Sambungan Las Gesek Aluminium Paduan A6061 menyebutkan dengan adanya sudut *chamfer* maka pada gaya tekan aksial yang sama, tekanan pada bagian tergesek semakin tinggi sehingga panas yang dihasilkan untuk mencairkan logam dalam pengelasan semakin tinggi. Kemudian, alur yang dibentuk sudut *chamfer* akan menjadi tempat pengisian logam cair dengan pencampuran yang lebih homogen bila dibandingkan dengan spesimen tanpa sudut *chamfer*. Semakin homogen bagian sambungan las maka kekuatan tarik semakin meningkat, tetapi pada kondisi sudut *chamfer* tertentu akan didapatkan kekuatan tarik sambungan las yang optimal. Dari penelitiannya didapatkan hasil kekuatan tarik rata-rata yang paling baik pada variasi sudut 30° yaitu sebesar 112,82 MPa, diikuti dengan variasi sudut 45° sebesar 105,52 MPa dan pada variasi sudut 15° sebesar 90,91 MPa (Irawan, dkk, 2008).

Magnesium (Mg) merupakan unsur kimia yang memiliki simbol (Mg) dengan nomor atom 12 dan berat atom 24,31 gr/mol. Magnesium juga dikategorikan sebagai salah satu logam ringan. Magnesium (Mg) merupakan logam yang paling umum digunakan ketiga setelah besi dan aluminium. Magnesium dikenal mempunyai sifat ringan, mudah terbakar dan mudah bereaksi dengan logam lain (Ibrahim, dkk, 2015). Pengaplikasian magnesium sebagai bahan dasar pengelasan dapat digunakan dalam bidang konstruksi kesehatan, salah satu contohnya adalah sebagai implan dalam proses penyambungan tulang yang patah. Hal ini bisa terjadi karena magnesium memiliki sifat mekanis yang menyerupai tulang serta memiliki biokompatibilitas yang cocok dengan tubuh manusia. Penggunaan paduan magnesium juga banyak digunakan di berbagai bidang industri, contoh aplikasi paduan magnesium diantaranya adalah untuk melapisi bahan dari besi dan baja sebagai sarana pelindung terhadap korosi.

Penggunaan paduan magnesium seri AM dan AZ (AM50A, AM60B dan AZ91D) merupakan kombinasi paduan yang sangat baik dari segi sifat mekanik, ketahanan korosi, serta mampu cor yang baik. Terutama pada seri

AZ mempunyai kekuatan spesifik yang tinggi (Buldum, 2011). Meskipun ada beberapa penelitian mengenai las gesek dengan berbagai macam variasi parameter pengelasan yang telah diterbitkan, namun data studi *friction welding* untuk material magnesium AZ-31B masih belum banyak ditemukan. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kualitas hasil sambungan pengelasan menggunakan metode *friction welding* pada magnesium AZ-31B dengan penambahan variasi sudut *chamfer*.

B. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari dilaksanakannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa data kekuatan tarik hasil dari pengelasan pada sambungan Magnesium AZ-31B terhadap variasi sudut *chamfer* yang sudah ditentukan menggunakan metode pengelasan gesek.
2. Menganalisa perubahan struktur mikro dalam hasil pengelasan gesek Magnesium AZ-31B.

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah magnesium AZ-31B dengan standar produsen industri.
2. Metode pengelasan yang dilakukan adalah *friction welding*.
3. Pengujian kualitas pengelasan menggunakan uji visual, uji tarik dan uji struktur mikro.

D. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan dari penelitian ini.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisikan teori-teori tentang pengelasan, jenis pengelasan, pengelasan gesek (*friction welding*), magnesium, pengujian tarik

III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini membahas tentang waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, pelaksanaan penelitian, pengujian kualitas hasil pengelasan, dan diagram alur penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas mengenai hasil dan pembahasan serta data-data yang didapat dari hasil penelitian.

V. SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisikan tentang hal-hal yang dapat disimpulkan dan saran yang ingin disampaikan dari penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan.

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

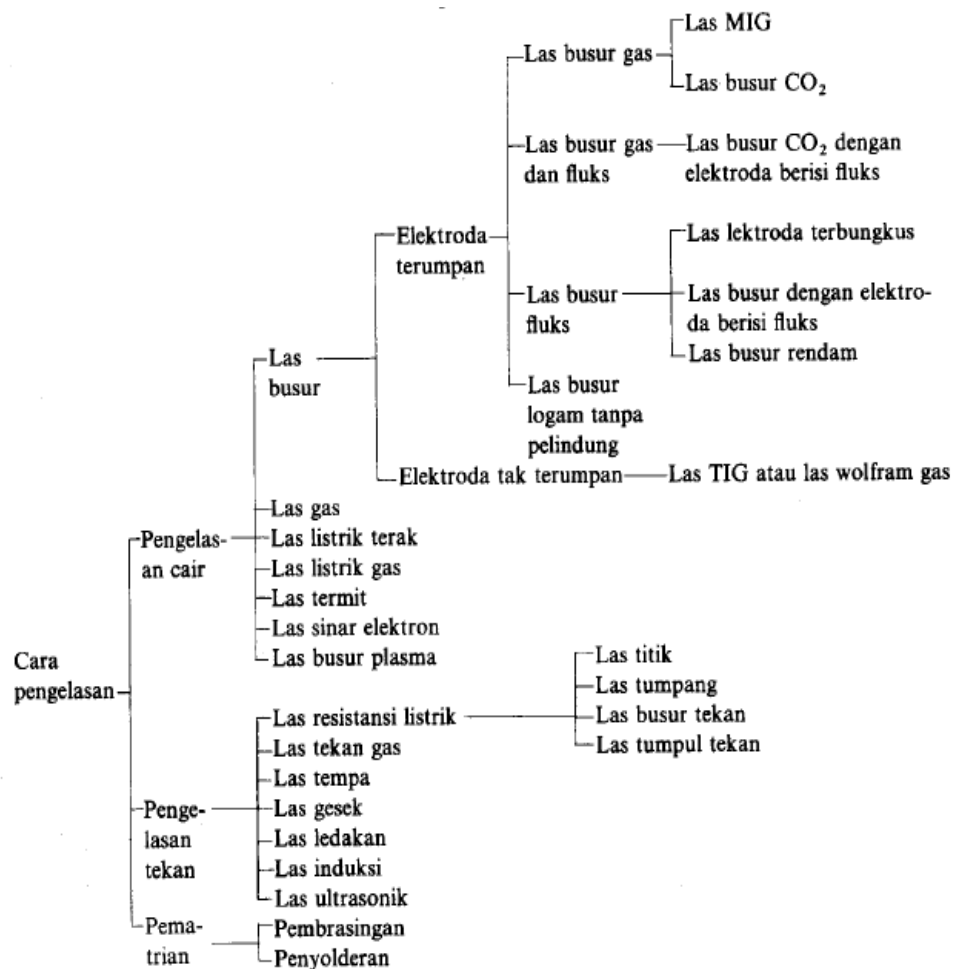
A. Pengelasan

Teknologi pengelasan merupakan salah satu peranan penting yang tidak bisa dipisahkan dalam dunia manufaktur, terutama dalam suatu pertumbuhan industri. Pengelasan menurut *Deutsche Industrie Normen* (DIN) dapat didefinisikan sebagai ikatan metalurgi dari sambungan logam atau paduan logam yang dilakukan saat logam dalam keadaan cair (*melting*). Dari definisi tersebut dapat diartikan bahwa pada proses pengelasan memerlukan energi panas untuk mencairkan atau melumerkan logam yang akan di las. Ada banyak langkah yang harus dilakukan dalam penyambungan dengan pengelasan untuk mendapatkan hasil yang optimal, mulai dari desain hingga pengerjaan (Naufal, dkk, 2016).

Pengelasan adalah salah satu metode penyambungan logam dengan cara melebur sebagian logam dasar (*Base Metal*) dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa logam tambahan dan menghasilkan sambungan yang kontinu (Wiryosumarto dan Okumura, 2000). Dalam ruang lingkup industri modern, secara umum proses pengelasan diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu: pengelasan dengan proses peleburan (*fusion welding*) dan pengelasan tanpa proses peleburan atau dalam kondisi padat (*solid-state welding*) (Solihin, dkk, 2017). Sampai saat ini sangat banyak pengklasifikasian yang dipakai dalam bidang pengelasan, salah satunya klasifikasi dalam cara kerja. Berdasarkan cara kerja pengelasan dapat diklasifikasikan ke dalam tiga metode yaitu:

1. Pengelasan cair adalah metode pengelasan di mana sambungan dipanaskan hingga meleleh menggunakan sumber panas dari busur listrik atau kilatan nyala api yang terbakar.
2. Pengelasan tekan adalah metode pengelasan di mana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan bersama hingga menjadi satu.
3. Pematrian adalah metode pengelasan di mana sambungan direkatkan dan diikat menggunakan paduan logam dengan titik leleh rendah. Dengan cara ini, logam dasar tidak ikut mencair.

Untuk lebih rinci dari pengklasifikasian diatas dapat dilihat pada gambar 1 yang terlampir di bawah ini.



Gambar 1. Klasifikasi cara pengelasan (Wirjosumarto dan Okumura, 2000)

B. Pengelasan Kondisi Cair (*Liquid State Welding*)

Proses pengelasan logam dalam pandangan umum diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu *Liquid State Welding* (LSW) dan *Solid State Welding* (SSW). *Liquid State Welding* adalah proses pengelasan logam yang dilakukan pada kondisi cair, sedangkan *Solid State Welding* adalah proses pengelasan dimana logam dalam keadaan padat selama pengelasan (Djamiko, 2008). Masing-masing pengelasan dengan metode LSW maupun SSW mempunyai kelebihan serta kekurangannya yang akan dijelaskan dibawah ini.

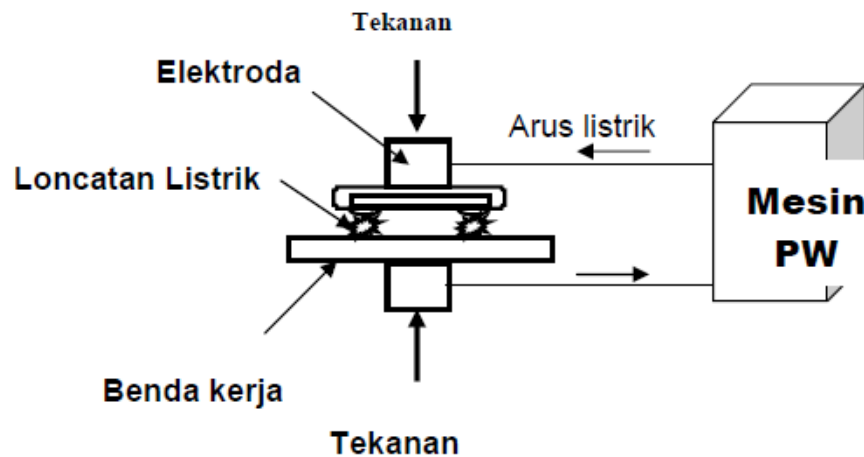
Proses pengelasan yang dilakukan dalam keadaan cair (*liquid state welding*) dibagi menjadi tiga kategori, yaitu 1) las busur listrik, 2) las tahanan, dan 3) las termal. Ketiga kategori ini didasarkan pada energi panas yang digunakan untuk melelehkan logam yang dilas. Persyaratan yang harus diperhatikan dalam pengelasan ini adalah bahan yang akan dilas harus sama.

1. Las busur listrik (*Electric Arc Welding*)

Dalam las busur listrik, energi panas dihasilkan oleh lompatan elektron dari elektroda las ke benda kerja. Besarnya energi dipengaruhi oleh arus dan tegangan listrik, serta jarak (*gap*) antara elektroda dengan benda kerja. Prinsip las busur listrik adalah bahwa kawat (*wire*) dari baterai yang terisi penuh dihubungkan satu ke terminal positif dan yang lain ke negatif, kedua ujungnya bersentuhan dan membentuk percikan api listrik. Percikan api akan menghasilkan panas, dan sebagai akibat dari pemanasan, kedua ujung kawat akan meleleh pada saat yang bersamaan (Samian, 1999). Banyak logam yang dapat dilas dengan metode ini, tetapi secara umum dapat dibagi menjadi 3 bagian, yaitu *flash butt*, *consumable electrode* dan *non consumable electrode*.

Flash butt welding adalah metode pengelasan yang menggabungkan lompatan elektron dengan tekanan, di mana benda kerja dipanaskan oleh energi lompatan elektron, kemudian ditekan dengan alat agar bahan yang akan dilas menyatu dengan baik. *Flash butt welding* digunakan antara lain

untuk menyambung benda-benda berbentuk pipa dan digunakan untuk proses penyambungan rel kereta api (Santosa, dkk, 2020). Salah satu contoh *flash butt welding* adalah las proyeksi (*projection welding*) seperti yang terlampir pada gambar 2.

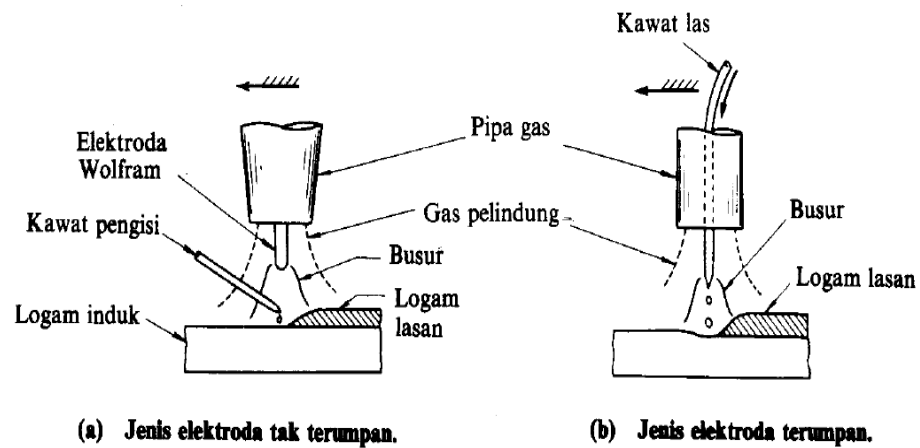


Gambar 2. Prinsip kerja *projection welding* (Djamiko, 2008)

Elektroda terumpan (*Consumable electrode*) adalah elektroda yang juga meleleh dan menghasilkan listrik selama pengelasan busur berlangsung (Rahmatika, dkk, 2019). Elektroda yang digunakan ada tiga jenis yaitu elektroda batang, elektroda spiral tidak berinti dan elektroda spiral dengan inti fluks di tengahnya. Elektroda batang digunakan dalam pengelasan listrik (*Shield Metal Arc Welding / SMAW*). Elektroda spiral tidak berinti digunakan dalam pengelasan *Metal Inert Gas* (MIG) dan *Metal Active Gas* (MAG).

Elektroda tidak terumpan (*Non consumable electrode*) adalah pengelasan yang menggunakan elektroda di mana elektroda tidak bertindak sebagai bahan tambah. Elektroda hanya berfungsi sebagai pembangkit listrik sedangkan bahan tambah digunakan sebagai logam pengisi (*filler metal*). Kelompok elektroda tak terumpan menggunakan batang tungsten (*wolfram*) sebagai elektroda yang dapat menghasilkan busur listrik tanpa ikut meleleh (Rirismarangi, dkk, 2019). Jenis pengelasan yang menggunakan prinsip elektroda tak terumpan adalah las TIG (*Tungsten*

Inert Gas) dan las plasma (*Plasma Arc Welding / PAW*). Perbedaan antara jenis elektroda dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Jenis elektroda (a) tak terumpan (b) terumpan (Wiryosumarto dan Okumura, 2000)

2. Las tahanan (*Resistance Welding*)

Pengelasan tahanan atau *resistance welding* biasanya digunakan pada saat mengelas plat-plat logam yang tipis, yang seringkali digunakan dalam industri otomotif. Panas yang digunakan untuk melelehkan logam dihasilkan oleh tahanan listrik pada elektroda las. Metode pengelasan tahanan terus berkembang dari tahun ke tahun baik untuk pengaplikasian pada industri konvensional hingga industri berteknologi tinggi. Ini berkat teknologi pengelasan resistensi yang unggul dibandingkan dengan metode pengelasan lainnya, yaitu prosesnya cepat, oleh karena itu cocok untuk produksi massal, pasokan panas cukup akurat dan teratur dan tidak memerlukan kawat las (Anis, dkk, 2009).

Pengelasan titik (*spot welding*) merupakan salah satu yang termasuk ke dalam las tahanan. Jenis ini adalah metode yang paling banyak digunakan dan juga paling sederhana. Kemudian las jenis lain yang termasuk ke dalam las tahanan adalah las kelim (*seam welding*), dilihat dari prinsip kerjanya, las kelim mirip dengan las titik, perbedaannya berada pada bentuk elektrodanya. Elektroda las kelim berbentuk silinder.

3. Las energi panas (*thermal welding*)

Energi panas yang digunakan pada proses pengelasan jenis ini merupakan proses konveksi dari hasil pembakaran gas atau karena sebab lain. Jenis proses pengelasan yang sesuai berdasarkan prinsip tersebut adalah pengelasan *oxy-acetylene*, pengelasan laser, dan pengelasan sinar elektron. Pengelasan yang paling banyak digunakan dengan prinsip ini adalah las gas.

OAW (*Oxy-Acetylene Welding*) atau yang biasanya dikenal sebagai las karbit merupakan pengelasan yang menggunakan gas *acetylene* sebagai bahan bakar. Dalam pengaplikasian pada las, gas *acetylene* dicampur dengan gas oksigen dan kemudian dibakar. Panas yang dihasilkan dari proses tersebut digunakan untuk pengelasan dan dimana proses penyambungannya tanpa disertai penekanan (Anggoro, dkk, 2015). Karena pencampuran antara gas *acetylene* dan oksigen inilah las karbit disebut sebagai las *Oxy-Acetylene*.

C. Pengelasan Kondisi Padat (*Solid State Welding*)

Kelompok proses pengelasan ini menggunakan tekanan dan panas (di bawah temperatur leleh) untuk menghasilkan penggabungan antar potongan yang akan disambung tanpa menggunakan logam pengisi. Proses pengelasan pada kategori ini meliputi: pengelasan dingin (*cold welding*), pengelasan eksplosif (*explosive welding*), pengelasan gesekan (*friction welding*), pengelasan tekanan frekuensi tinggi (*high frequency pressure welding*), pengelasan tempa (*forge welding*), pengelasan palu (*hammer welding*), pengelasan ultrasonik (*ultrasonic welding*), dll (Khan, 2007).

Kelebihan kelompok pengelasan jenis *solid state welding* yaitu bahan yang akan disambung tidak harus sama dan efek panas yang menyebabkan terjadinya *heat affected zone* (HAZ) dapat dihilangkan sesedikit mungkin.

Daerah terpengaruh panas atau *heat affected zone* yang terjadi di sekitar sambungan las ini dapat mengubah karakteristik atau sifat dari logam dasar itu sendiri, hal ini bisa terjadi karena pengelasan dilakukan dibawah temperatur leleh material.

1. Pengelasan dingin (*cold welding*)

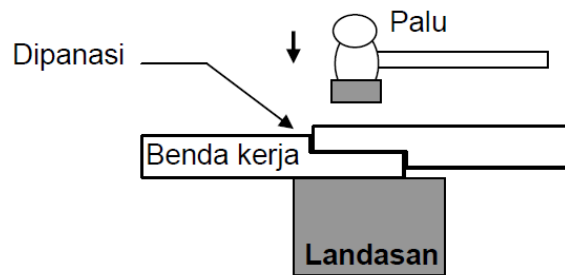
Pengelasan dingin adalah pengelasan yang dilakukan dalam kondisi dingin. Yang dimaksud dengan dingin disini bukan berarti tidak ada panas, panas dapat berasal dari proses tersebut, tetapi tidak melebihi suhu rekristalisasi dari logam yang dilas. Proses penyambungan logam terjadi karena tekanan yang sangat tinggi atau lewatnya atom logam melintasi antarmuka antara dua logam yang akan dilas, oleh karena itu jenis pengelasan ini tidak boleh dipengaruhi oleh oksida logam, dan permukaan yang akan disambung harus rata dan halus.

2. Pengelasan eksplosif (*explosive welding*)

Las eksplosif atau las ledakan diklasifikasikan sebagai pengelasan dingin. Proses pengelasan berlangsung di bawah suhu rekristalisasi material yang akan dilas. Penyambungan material yang dilakukan pada temperatur di bawah temperatur rekristalisasi logam ini memiliki banyak keunggulan antara lain tidak terlalu mempengaruhi struktur mikro material, dapat menggabungkan material dengan titik leleh yang berbeda, sehingga sambungan las memiliki kualitas yang sangat baik.

3. Pengelasan tempa (*forge welding*)

Penyambungan logam dengan cara ini dilakukan dengan cara memanaskan ujung logam yang akan disambung, kemudian ditempa, setelah itu dilakukan penyambungan. Panas yang dibutuhkan sedikit lebih tinggi dari suhu rekristalisasi logam, sehingga logam masih dalam keadaan padat. Aplikasi las tempa dapat dilakukan untuk pembuatan pedang pada zaman kuno. Secara sederhana prinsip kerja pengelasan tempa dijelaskan pada gambar 4.



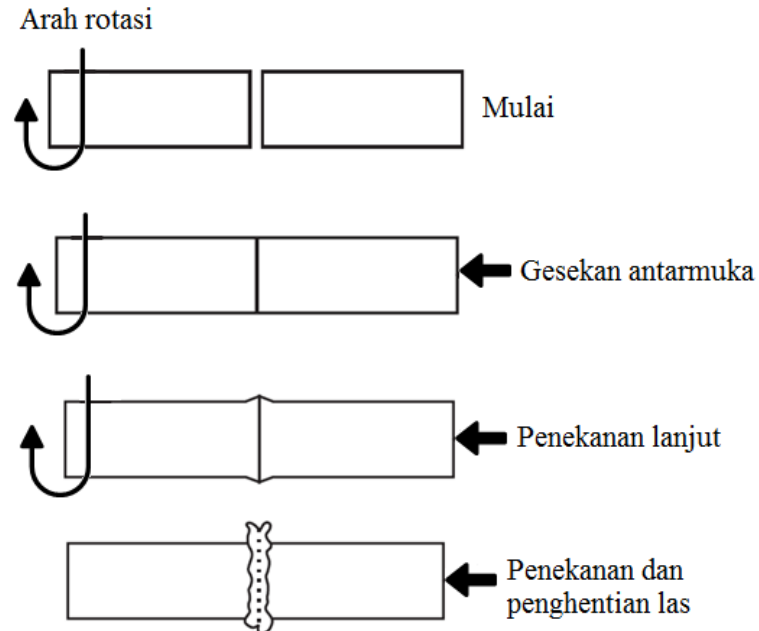
Gambar 4. Prinsip kerja las tempa (Djamiko, 2008)

D. Pengelasan Gesek (*Friction Welding*)

Pengelasan gesek (*friction welding*) adalah salah satu metode proses pengelasan dalam keadaan padat (*solid-state welding*) yang mana prinsip kerjanya yaitu meleburkan material itu sendiri dengan menggunakan panas yang dihasilkan antara permukaan melalui kombinasi gerakan rotasi dan penerapan beban tekan. Teknologi pengelasan gesek cukup menarik perhatian di zaman modern ini, mengingat teknologi pengelasan gesek ini mudah dioperasikan, alur kerjanya cepat, tidak perlu logam pengisi, tidak perlu grooving, dan memiliki hasil sambungan yang baik. Mudah dioperasikan karena mesin las gesek mirip dengan mesin bubut.

Dalam metode pengelasan gesek ini panas dihasilkan oleh perubahan energi mekanik menjadi energi panas pada bagian permukaan karena adanya gesekan selama gerak putar di bawah tekanan (gesekan). Beberapa manfaat pengelasan gesek yaitu seperti tidak memerlukan logam pengisi dan waktu yang relatif cepat untuk penyambungan dua bahan yang serupa maupun berbeda (Sanyoto, dkk, 2012). Sedangkan parameter pada saat proses pengelasan berlangsung sangat mempengaruhi terhadap kualitas sambungannya, yang mana parameter tersebut meliputi kecepatan putar, waktu gesekan, tekanan gesekan, waktu tempa dan tekanan tempa. Pada proses penyambungan ini, proses deformasi plastis terjadi karena tekanan

tempa (forging) dan proses difusi terjadi karena adanya panas yang tinggi yang mengarah pada kualitas sambungan yang tinggi antara bahan sejenis maupun berbeda. Prinsip pengelasan gesek secara sederhana dijelaskan pada gambar 5.



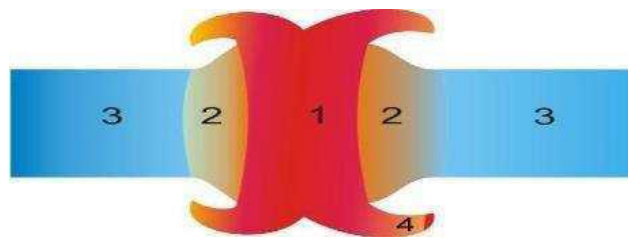
Gambar 5. Prinsip kerja pengelasan gesek (*friction welding*) (Khan, 2007)

Terlihat pada gambar 5 merupakan prinsip kerja pada pengelasan gesek selama proses pengelasan dimulai sampai selesai. Pertama-tama pada material yang dipasang pada chuck rotasi (sebelah kiri) diberikan gerak putar, setelah itu material yang diletakkan pada chuck diam (sebelah kanan) diberikan gaya tekanan untuk memungkinkan terjadinya gesekan, adanya gesekan ini sebagai sumber panas, sumber panas ini tergantung pada kecepatan rotasi dan tekanan gesekan. Setelah mencapai temperatur las nya, kemudian mesin las gesek dihentikan dan setelahnya diberikan gaya tekan akhir sehingga terjadi proses penempaan (tekanan tempa), metode ini sangat cocok bila dimanfaatkan untuk menyambung material yang memiliki sifat mudah terbakar pada suhu tinggi, contohnya adalah magnesium.

Selama pengelasan gesek berlangsung, kecepatan rotasi, tekanan (gesek dan tempa) yang diberikan, dan waktu dari pengelasan merupakan tiga variabel

yang dapat dikontrol. Dua persyaratan umum untuk menghasilkan sambungan las yang baik selain daripada parameter yang sudah disebutkan adalah yang pertama material yang akan disambung memiliki sifat mampu tempa, lalu yang kedua material yang digunakan dapat menghasilkan gesekan antar permukaan material yang akan disambung. Dengan begitu mengacu pada syarat yang pertama dapat disimpulkan bahwa beberapa material seperti keramik, besi cor dan semen karbida tidak dapat disambung menggunakan pengelasan gesek. Kemudian mengacu pada syarat yang kedua maka dapat juga disimpulkan bahwa material yang bisa digunakan yaitu yang mengandung paduan yang dapat menghasilkan pelumasan kering (Satyadianto, 2015).

Pengelasan gesek untuk logam yang serupa cenderung lebih mudah untuk dilakukan, hal ini disebabkan karena properti yang cocok antara kedua material yang dilas. Karena sifat material cocok, maka panas akan menyebar secara merata pada kedua sisi sambungan dan karakteristik deformasi identik pada kedua sisi sambungan, hal ini akan menghasilkan sambungan yang simetris dan memiliki sifat yang baik. Berikut merupakan daerah yang terdapat dari setelah dilakukannya pengelasan gesek, ditunjukkan pada gambar 6.



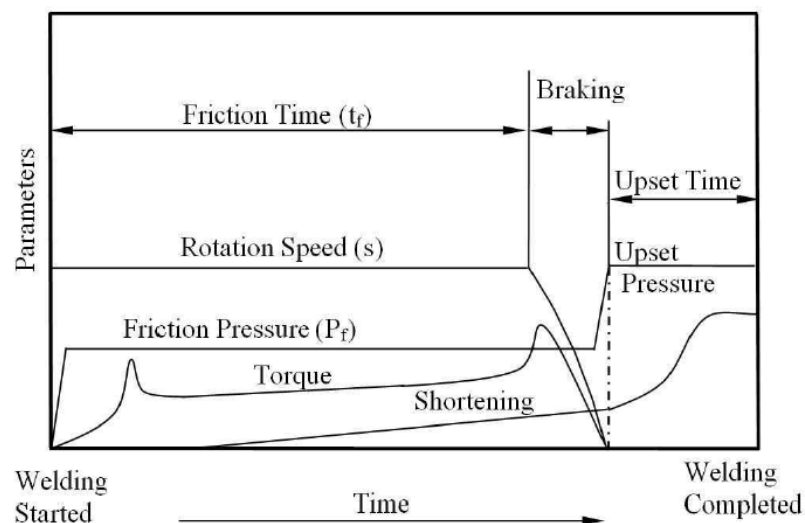
Gambar 6. Daerah pengelasan gesek (Purnomo, 2016)

Daerah pengelasan merupakan daerah yang terpengaruh panas pada saat proses pengelasan, efek panas tersebut menyebabkan perubahan pada struktur mikro dan sifat mekanik, ada juga yang tidak merubah struktur mikro dan sifat mekaniknya (Purnomo, 2016). Secara umum, dalam proses pengelasan gesek akan menghasilkan struktur las seperti: logam dasar (based metal, BM), daerah terpengaruh panas (*heat affected zone*, HAZ) dan daerah las (*weld*

zone, WZ) atau juga diidentifikasi sebagai daerah putaran (*stir zone, SZ*). Pada gambar 6 terlihat bahwa daerah pengelasan gesek terbagi menjadi 4 yaitu:

1. Daerah yang berwarna merah atau disebut daerah las (*weld zone, WZ*) adalah daerah utama pengelasan yang mengalami pembekuan akibat pengaruh dari gesekan kedua material disertai dengan proses penempaan (tekanan tempa).
2. Merupakan *heat affected zone (HAZ)* yang mana adalah daerah yang mengalami perubahan struktur mikro dan karakteristik mekanismenya akibat distribusi panas yang dihasilkan pada daerah las (*weld zone, WZ*). Daerah HAZ merupakan daerah yang paling kritis dari sambungan las ini karena selain berubah strukturnya juga terjadi perubahan sifat pada daerah tersebut.
3. Logam induk adalah suatu daerah dimana suhu pemanasan akibat pengelasan tidak menyebabkan perubahan struktur mikro dan sifat mekanik.
4. *Flash* merupakan lelehan yang keluar dari pusat kedua bidang material akibat gesekan dan penempaan.

Pada proses pengelasan gesek terbagi menjadi 3 fase, sebagaimana dijelaskan pada gambar 7.



Gambar 7. Skema pengelasan gesek (Sahin, 2005)

Berdasarkan bentuk kurva pada gambar 7, pengelasan gesek dibagi menjadi tiga fase, diantaranya yaitu:

1. Fase gesekan awal (*friction phase*)
pada fase ini torsi mengalami peningkatan setelah dimulainya proses, kemudian torsi akan turun sebelum mencapai fase yang kedua seiring dengan penurunan kecepatan rotasi dan selanjutnya terjadi peningkatan temperatur serta pelunakan pada material di permukaan benda kerja dikarenakan sumber panas yang dihasilkan gesekan kedua buah logam, pada fase pertama juga dibutuhkan waktu yang cukup besar dibandingkan dengan fase lainnya.
2. Fase berhenti (*braking phase*)
Fase yang kedua adalah fase berhenti (*braking phase*), pada tahap ini diharapkan durasi waktu dilakukan secepat mungkin sehingga panas yang dihasilkan tidak hilang dan kedua permukaan material pada saat ini harus memiliki panas yang cukup sehingga kedua bagian dapat ditempa bersama.
3. Fase penempaan (*upset phase*)
Masuk ke fase yang ketiga yaitu fase penempaan (*upset phase*), pada fase ini terjadi perubahan tekanan gesek menjadi tekanan tempa yang mana dilakukan pada saat tidak adanya gerakan rotasi dan pada fase ini tekanan tempa dibedakan dengan tekanan gesek yang mana lebih dinaikkan guna memperkuat sambungan las. Dan pada tahap ini material mengalami pemendekan (*shortening*) yang diakibatkan oleh penempaan tersebut.

Dalam penelitian yang berjudul analisis sifat mekanik dan struktur mikro aluminium paduan seri 6061 hasil pengelasan *friction welding* dengan variasi sudut didapatkan hasil pengujian tarik diperoleh rata-rata *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dengan menggunakan variasi sudut pengelasan 30^0 adalah yang tertinggi yaitu sebesar 124,3 MPa sedangkan rata-rata *Ultimate Tensile Strength* (UTS) yang terendah terdapat pada variasi sudut pengelasan 15^0

yaitu sebesar 49,3 MPa, dan pada variasi sudut 45^0 disebutkan rata-rata *Ultimate Tensile Strength* (UTS) nya sebesar 90,2 MPa (Gama, 2013).

Dalam penelitiannya yang berjudul pengaruh waktu gesek dan sudut *chamfer* terhadap sifat mekanik aluminium 6061 pada proses *friction welding* menyebutkan bahwa hasil pengujian tarik dengan variasi parameter $30^0/120$ detik mendapatkan hasil rata-rata kekuatan tarik maksimal yang paling baik yaitu sebesar $15,86 \text{ N/mm}^2$, sedangkan untuk variasi parameter $60^0/60$ detik memberikan hasil rata-rata yang paling rendah yaitu sebesar $5,16 \text{ N/mm}^2$ (Sugianto, 2016).

E. Kelebihan dan Kekurangan Pengelasan Gesek

Proses penyambungan dengan metode pengelasan gesek memiliki beberapa kelebihan serta kekurangan, adapun kelebihan dan kekurangan dari *friction welding* adalah sebagai berikut:

1. Kelebihan pengelasan gesek (*friction welding*)

Dalam melakukan proses penyambungan dengan metode pengelasan gesek mempunyai kelebihan, antara lain:

- a. Tidak memerlukan logam pengisi, pelindung *fluks* dan gas pelindung selama proses pengelasan.
- b. Tidak terdapat cacat akibat fenomena pencairan dan pembekuan.
- c. Biaya pengerjaan relatif murah.
- d. Kebersihan permukaan sambungan tidak diperlukan, karena selama proses gesekan permukaan akan terkelupas dan terdeformasi ke bagian luar.
- e. Dimungkinkan untuk menyambung dua material logam yang berbeda.

2. Kekurangan pengelasan gesek (*friction welding*)

Tetapi dalam proses pengelasan gesek juga memiliki kekurangan, antara lain:

- a. Benda yang akan dilakukan pengelasan harus simetris.
- b. Proses penyambungan terbatas hanya pada material yang memiliki permukaan plat dan silinder pejal.
- c. Salah satu material yang disambung harus memiliki sifat mampu deformasi secara plastis.

F. Magnesium

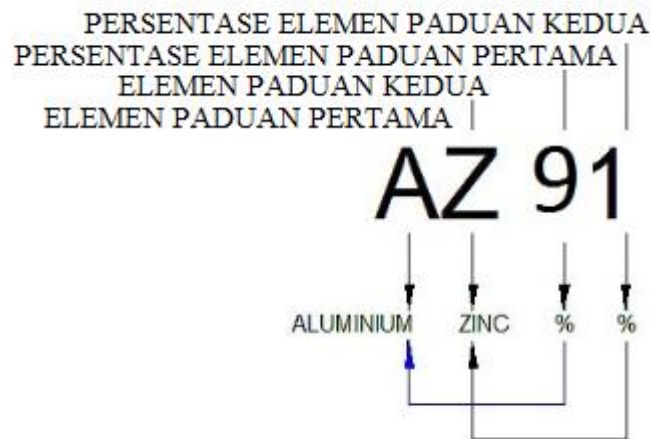
Magnesium (Mg) merupakan unsur kimia yang memiliki simbol (Mg) dengan nomor atom 12 dan berat atom 24,31 gr/mol. Magnesium (Mg) merupakan logam yang paling umum digunakan ketiga setelah besi dan aluminium. Magnesium murni dan paduannya telah dikenal sebagai material yang memiliki sifat ringan, mudah terbakar dan mudah bereaksi dengan logam lain. Magnesium murni tidak memiliki kekuatan yang cukup, sehingga magnesium sangat baik bila dipadukan dengan berbagai elemen untuk mendapatkan sifat yang lebih baik, terutama kekuatan untuk rasio berat yang tinggi. Magnesium mempunyai sifat kekuatan spesifik yang tinggi dan kekakuan, mampu mesin yang baik, mampu cor serta kemampuan las dengan beberapa metode membuat menarik untuk diaplikasikan di dunia industri.

Magnesium memiliki densitas atau rapat masa sebesar 1.738 g.cm^{-3} , titik lebur sekitar 923°K (650°C , 1202°F), titik didih 1363°K (1090°C , 1994°F). Magnesium murni memiliki kekuatan tarik sebesar 110 N/mm^2 dalam bentuk hasil pengecoran (*casting*). Magnesium murni mempunyai ciri fisik berwarna putih keperakan (Setiawan, 2014). Pengaplikasian magnesium sebagai bahan dasar pengelasan dapat digunakan dalam bidang konstruksi kesehatan, salah satu contohnya adalah sebagai implan dalam proses penyambungan tulang yang patah. Hal ini bisa terjadi karena magnesium memiliki sifat mekanis yang menyerupai tulang serta memiliki biokompatibilitas yang cocok dengan tubuh manusia. Penggunaan paduan magnesium juga banyak digunakan di

berbagai bidang industri, contoh aplikasi paduan magnesium diantaranya adalah untuk melapisi bahan dari besi dan baja sebagai sarana pelindung terhadap korosi.

Paduan magnesium banyak digunakan di berbagai industri karena memerlukan sifat khusus untuk tujuan khusus. Pada komponen elektronika, magnesium juga mempunyai konduktivitas yang baik (*good conductivity*), bahkan magnesium juga banyak digunakan sebagai bahan pembuatan pesawat terbang dan roket karena bobotnya yang ringan dan kekuatan yang relatif baik. Begitu juga aplikasinya di bidang otomotif, salah satu aplikasi utama paduan magnesium di bidang otomotif adalah bahan untuk blok silinder mesin yang membutuhkan sifat ringan dan konduktivitas termal yang baik, ketahanan suhu tinggi dan kekuatan yang baik, yang membuatnya banyak digunakan. (Ibrahim, dkk, 2015). Bahan magnesium yang sangat mudah terbakar membuatnya sulit di las menggunakan pengelasan cair. Untuk mengatasi hal tersebut, dapat menggunakan jenis pengelasan padat seperti pengelasan *friction welding* atau pengelasan *friction stir welding* tergantung dari bentuk material dan posisi sambungan yang diinginkan (Saputra, 2017).

Paduan magnesium sering digunakan terutama untuk bahan yang memerlukan massa yang ringan tetapi juga baik dari segi kekuatannya. Magnesium biasanya dicampur dengan bahan lain seperti aluminium, mangan, dan juga zinc untuk meningkatkan sifat fisik, tetapi dengan beberapa persentase yang berbeda. Magnesium AZ91 adalah salah satu contoh paduan magnesium dengan aluminium dan zinc, di mana persentase dari masing-masing paduan sekitar 9% dan 1%. Sebagaimana untuk penamaan paduan magnesium ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Penamaan paduan magnesium (Buldum, 2011)

Paduan magnesium seri AM dan AZ (AM50A, AM60B dan AZ91D) merupakan kombinasi paduan yang sangat baik dari segi sifat mekanik, ketahanan korosi, serta mampu cor yang baik. Terutama pada seri AZ mempunyai kekuatan spesifik yang tinggi (Buldum, 2011). Paduan magnesium mempunyai kelebihan dan kelemahan. Paduan magnesium mempunyai kelebihan yaitu paduan magnesium memiliki masa jenis terendah dibanding konstruksi material lain. Mampu cor yang baik membuat paduan magnesium cocok untuk dilakukan pengecoran bertekanan tinggi. Karena paduan magnesium memiliki sifat yang ringan dan lunak, maka dapat dilakukan proses pemesinan pada kecepatan tinggi.

G. Pengujian Visual

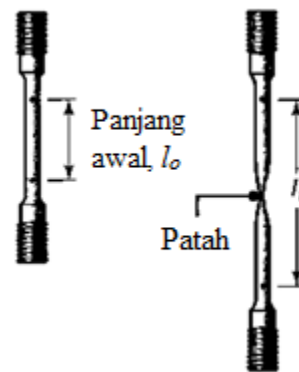
Pengujian Visual merupakan pengujian peralatan dan struktur dengan menggabungkan indera manusia seperti penglihatan, pendengaran, sentuhan dan penciuman. Pengujian visual merupakan salah satu metode inspeksi las yang paling populer dalam kategori pengujian non-destruktif dibandingkan dengan metode lain seperti *Magnetic Particle Inspection Testing* (MT), *Liquid (Dye) Penetrant Test* (PT), *X-Ray Inspection Testing* (RT), dan *Ultrasonic*

Testing (UT). Pengujian visual merupakan langkah awal sebelum dilakukan pengujian lainnya seperti pengujian merusak. Pengujian visual adalah salah satu pengujian yang sangat sederhana yang mana pengujiannya dilakukan tanpa membutuhkan peralatan yang khusus dan biasanya hanya menggunakan kaca mata pembesar, senter dan alat pendukung lainnya. Untuk dilakukannya pengujian secara visual hanya perlu melakukan pengamatan pada spesimen bahan. Hal ini sangat efektif dalam mendeteksi cacat mikroskopik atau cacat permukaan besar, contohnya cacat pada hasil pengelasan yang kurang baik.

Keuntungan dari metode pengujian visual adalah biaya yang dikeluarkan murah dan tidak terlalu rumit karena tidak melibatkan alat yang sulit digunakan. Adapun Kelemahannya metode pengujian visual adalah hanya dapat mendeteksi adanya cacat yang berada pada permukaan material uji dan hanya dapat mendeteksi adanya cacat yang dapat dilihat dengan mata telanjang ataupun dengan alat bantu optik (Irwansyah, 2019).

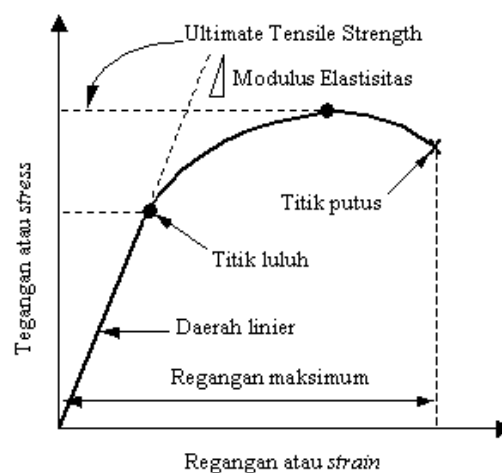
H. Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan metode yang paling umum digunakan untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu material seperti tegangan, regangan serta modulus elastisitas, pengujian tarik dilakukan dengan cara memberikan gaya tarik pada material secara terus menerus dan konstan sampai terjadinya putus, uji tarik juga dikategorikan sebagai pengujian merusak untuk mengetahui kekuatan logam hasil pengelasan. Skema pengujian tarik dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Spesimen sebelum dan sesudah pengujian tarik (Kalpakjian *and* Schmid, 2009)

Pengujian tarik material dapat dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine*, benda uji dijepit pada mesin uji tarik, kemudian beban statik dinaikkan secara bertahap sampai benda uji putus. Besarnya beban dan pertambahan panjang dihubungkan langsung dengan *Plotter*, sehingga diperoleh grafik tegangan (MPa) dan regangan (%) yang memberikan informasi data berupa tegangan luluh (σ_{ys}), tegangan *Ultimate* (σ_{ult}), Modulus Elastisitas bahan (E), ketangguhan dan keuletan spesimen yang diuji tarik seperti yang ditunjukkan pada gambar 10.



Gambar 10. Kurva tegangan dan regangan uji tarik (Kalpakjian *and* Schmid, 2009)

Dengan menarik material, kita dapat mengetahui bagaimana material merespon beban tarik dan seberapa besar pertambahan panjang material. Fenomena material bereaksi terhadap beban tarikan hingga putus ditampilkan pada sebuah kurva pada gambar 10 yang menunjukkan hubungan antara tegangan dan regangan. Dari kurva ini, kekuatan luluh dan modulus elastis dapat ditentukan dan besar beban dalam pengujian ini disebut kekuatan tarik maksimum. Setelah benda uji patah, panjang akhir dan *Cross-Sectional* area digunakan untuk menghitung persentase perpanjangan dan pengurangan luas. Gaya tarik terhadap spesimen uji tarik diberikan oleh mesin uji tarik (*Universal Testing Machine*) yang menyebabkan benda uji memanjang hingga kemudian putus (Tony, 2005). Dalam pengujian, spesimen uji dibebani dengan kenaikan beban sedikit demi sedikit hingga spesimen uji tersebut patah, kemudian sifat-sifat tarikannya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Callister, 2007):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

E = Modulus elastisitas (N/mm^2)

σ = Tegangan maksimum (N/mm^2)

ε = Regangan

Regangan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_o}{L_o} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

ε = Regangan

L = Panjang awal batang uji (mm)

L_o = Panjang batang uji yang dibebani (mm)

Tegangan dapat dihitung dengan rumus:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

σ = Tegangan (N/mm^2)

F = Beban (N)

A_0 = Luas penampang batang uji (mm^2)

I. Pengujian Struktur Mikro

Pengujian metalografi adalah metode untuk melihat struktur logam dengan menggunakan mikroskop optik dan mikroskop elektron. Sedangkan struktur yang tampak pada mikroskop disebut struktur mikro. Pengamatan tersebut dilakukan pada spesimen yang telah diproses sehingga bisa diamati dengan perbesaran tertentu (Ismail dan Wijaya, 2016). Material logam paling sering dianalisis saat melakukan uji struktur mikro karena berhubungan langsung dengan sifat mekanik logam.

Pada dasarnya pengamatan metalografi adalah mengamati perbedaan intensitas sinar yang dipantulkan ke permukaan logam yang dimasukkan ke dalam mikroskop sehingga muncul gambar yang berbeda (gelap, agak terang, terang). Dengan begitu ketika seberkas sinar mengenai permukaan spesimen maka sinar tersebut akan dipantulkan sesuai dengan orientasi sudut permukaan bidang yang terkena sinar. Jika permukaan tidak rata, maka intensitas sinar yang terpantul ke dalam mikroskop semakin sedikit. Akibatnya, warna yang tampak pada mikroskop adalah warna hitam.

Struktur mikro sendiri adalah gambaran dari sekumpulan fasa yang dapat diamati dengan teknik metalografi. Struktur mikro suatu logam dapat dilihat melalui mikroskop. Mikroskop yang dapat digunakan adalah mikroskop optik dan mikroskop elektron. Sebelum dilihat dengan mikroskop, permukaan logam terlebih dahulu harus dibersihkan, kemudian diberikan bahan kimia untuk mempermudah pengamatan. Proses ini dinamakan etsa (*etching*). Dari pengujian struktur mikro dapat dilihat:

1. Ukuran dan bentuk butir
2. Distribusi fasa yang terdapat dalam material khususnya logam
3. Pengotor yang terdapat dalam material

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

1. Tempat Penelitian

Proses penelitian melibatkan tempat yang berbeda sesuai dengan tahapan pengerjaan yang dilakukan antara lain:

- a. Proses pemotongan material uji atau spesimen uji dilaksanakan dilab produksi jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
- b. Proses pembuatan sudut *chamfer* dengan variasi 15^0 , 30^0 dan 45^0 dilaksanakan di lab produksi jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
- c. Proses pengelasan gesek dilaksanakan di bengkel las Politeknik Negeri Semarang
- d. Pengujian tarik dilaksanakan di lab material jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
- e. Pengujian struktur mikro dilaksanakan di lab Metalurgi Institut Teknologi Bandung

2. Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli 2022 – September 2022.

B. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Magnesium AZ-31B

Magnesium memiliki komposisi serta sifat fisik yang ditampilkan dalam gambar 11 dan tabel 1 berikut ini:



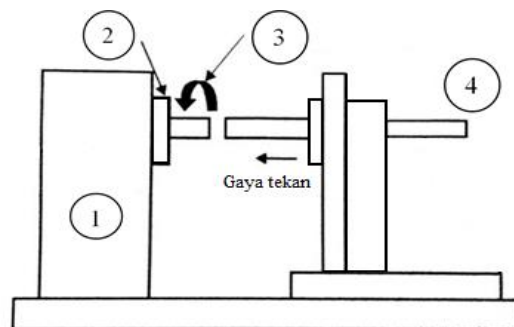
Gambar 11. Magnesium AZ-31B

Tabel 1. Komposisi magnesium AZ31B.

Unsur	Kadar (ppm)
Mg	454,845
Zn	5,818
Al	15,083

2. Sketsa alat las gesek

Sketsa alat pengelasan gesek yang digunakan dapat dilihat pada gambar 12.



Keterangan:

1. Kepala tetap
2. Pencekam
3. Bagian berputar
4. Bagian diam

Gambar 12. Sketsa alat las gesek

3. Mesin las gesek

Untuk menggabungkan material dengan metode pengelasan gesek menggunakan mesin seperti ditunjukkan pada gambar 13.



Gambar 13. Mesin las gesek

SPEKIFIKASI:

Power motor spindel: 3,7 kWatt

Putaran: 2000 RPM

Panjang mesin: 1300 mm

Tinggi mesin: 1130 mm

Lebar mesin: 760 mm

4. Mesin uji tarik

Untuk mengetahui kekuatan tarik dari sambungan lasan, spesimen diuji dengan mesin uji tarik MTS Landmark berkapasitas 100 KN yang ditunjukkan pada gambar 14.



Gambar 14. Mesin uji tarik

SPEKIFIKASI

Merk : MTS Landmark

Kapasitas : 100 kN

Tipe : U PD 10

Tahun : 2015

Memiliki tiga skala pengukuran beban:

A = 0 s/d 20 kN

A+B = 0 s/d 50 kN

A+B+C = 0 s/d 100 k

5. Mikroskop optik

Untuk mengetahui hasil dari pengujian struktur mikro dapat menggunakan alat yang terlampir pada gambar 15.



Gambar 15. Mikroskop optik

C. Pelaksanaan Penelitian

Proses pengelasan dengan metode pengelasan gesek dilakukan di Laboratorium Produksi Universitas Lampung, Bandar Lampung dimana parameter pengerjaannya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter percobaan pengelasan gesek

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Diameter spesimen (D)	20	mm
2	Panjang spesimen (L)	180	mm
3	Kecepatan putar (N)	1750	RPM
4	Waktu gesek (t_1)	2	Menit
5	Beban gesek (P_1)	3	Kg
6	Waktu tempa (t_1)	30	Detik
7	Beban tempa (P_2)	4	Kg
8	Sudut chamfer (α)	15	Derajat
		30	
		45	

Tabel 2. menunjukkan parameter yang digunakan dalam eksperimen pengelasan gesek, diameter benda uji (D), Panjang benda uji (L), kecepatan putar *spindle* (N), beban gesek (P_1) waktu penggesekan (t_1), beban tempa (P_2), waktu tempa (t_2) dan sudut *chamfer* (α).

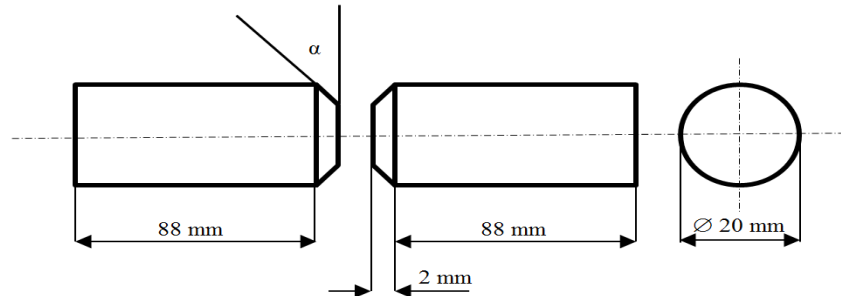
Adapun tahapan pengerjaan pengelasan adalah sebagai berikut:

1. Prosedur pembuatan *chamfer* pada benda uji atau spesimen uji

Adapun prosedur pembuatan *chamfer* pada benda uji pada penelitian tugas akhir adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan benda uji bahan Magnesium AZ31B dengan ukuran panjang masing-masing 90 mm dan diameter 20 mm.
- b. Meletakkan benda uji pada mesin bubut untuk proses pembubutan.

- c. Membuat sudut *chamfer* dengan variasi 15° , 30° dan 45° dengan mesin bubut pada beberapa spesimen yang akan dilakukan pengelasan. Hasil pembuatan sudut *chamfer* pada spesimen dapat dilihat pada gambar 16.



Gambar 16. Spesimen dengan sudut *chamfer*

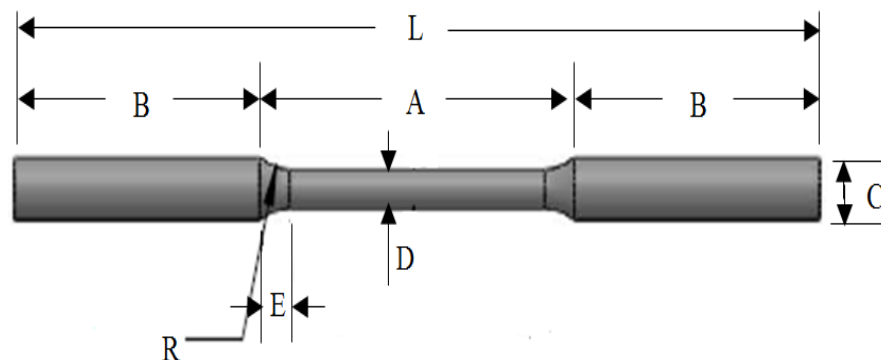
2. Prosedur pengelasan

Adapun prosedur pengelasan pada penelitian tugas akhir adalah sebagai berikut:

- a. Mempersiapkan terlebih dahulu alat las gesek dan seperangkat elektronika alat las gesek.
- b. Meletakkan alat las gesek keatas meja mesin bubut dan pastikan rel mesin bubut dalam keadaan bersih.
- c. Mengatur jarak pada alat ke spindle yang diperlukan dalam pengelasan.
- d. Mengunci dudukan alat yang terletak dibagian depan dan belakang alat.
- e. Mengkalibrasi sensor tekan alat terdapat didalam *chuck*.
- f. Memasang seperangkat *chuck* pada dudukan pada alat.
- g. Memasang seperangkat elektronika alat dibagian belakang dan mencolokkan ke daya listrik.
- h. Menyambungkan kabel dinamo dan sensor kabel *power supply*.
- i. Mengkalibrasi ketinggian alat dengan *spindle* mesin bubut.
- j. Memasang benda kerja yang akan di uji, pastikan terkunci dengan kuat dan pastikan kembali benda kerja dalam keadaan sejajar.
- k. Mengatur kecepatan *spindle* mesin bubut yang akan dibutuhkan.
- l. Mendekatkan benda kerja yang akan diuji hingga menempel.

- m. Mengatur alat elektronika sesuai parameter yang di inginkan.
 - n. Menghidupkan *spindle* mesin bubut.
 - o. Menghidupkan elektronika alat.
 - p. Menunggu beberapa saat benda mengalami gesekan hingga mengalami cair pada permukaannya dan sensor alat elektronika berbunyi.
 - q. Matikan *spindle* mesin bubut setelah selesai.
 - r. Menunggu proses *forging load* sesuai waktu yang di inginkan.
 - s. Melepaskan benda kerja dari *spindle*.
 - t. Menekan tombol *push button* mundur pada elektronika untuk menarik benda kerja mundur dan mengembalikan keposisi awal.
 - u. Menekan tombol *push button* mundur untuk mematikan kerja motor.
 - v. Melepaskan benda kerja yang terkunci pada alat dan mengambil benda kerja yang panas dengan kain serta melihat hasil pengujian.
 - w. selesai.
3. Prosedur pengujian tarik

Sebelum dilakukan pengujian kualitas pengelasan gesek spesimen di bentuk sesuai dengan dimensi yang sudah di tentukan, dapat dilihat pada gambar 17 dan tabel 3 sebagai keterangan. Setelah di bentuk sesuai dimensi yang sudah ditentukan baru dilakukan pengujian kualitas pengelasan.



Gambar 17. Spesimen uji tarik standar ASTM E8 (*Standard Test for Tension Testing of Metallic*)

Tabel 3. Dimensi Spesimen Uji Tarik Standar ASTM E8

Keterangan	Nilai
D – Diameter tengah	$6 \pm 0,1$ mm
C – Diameter <i>grip</i>	12,5 mm
A – Panjang bagian tengah	32 mm
B – Panjang <i>grip</i>	60 mm
L – Panjang keseluruhan	160 mm
R – Radius	6 mm
E – Lebar radius	5 mm

Adapun prosedur pengujian tarik pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Menyiapkan spesimen atau material uji sesuai dengan standar ASTM E8M yang sudah dilas.
- b. Membuka program *Controller 793B* setelah itu klik manual *command*, pilih *displacement mode*, lalu naikan *actuator* ke posisi nol (*zero*).
- c. Memasang spesimen atau material uji pada *cross head grip* atas kemudian spesimen dicekam.
- d. Lalu menurunkan *cross head* sampai ujung bawah spesimen masuk kedalam *grip* bawah dengan kedalaman 3 cm.
- e. Klik manual *command* dan klik *control mood* ke *force*.
- f. Kemudian klik auto *offset* untuk *force*. Setelah itu *grip* bagian bawah dicekam sehingga ujung spesimen bagian bawah tidak berubah.
- g. Memasang *extensometer* ke spesimen dengan posisi *zero pin*, dan klik manual *offset* untuk *extensometer*. Lalu melepaskan *zero pin* dari *extensometer*.
- h. Membuka *Software MTS Test Suite* (MPE), pilih *template* untuk uji tarik statis.
- i. Memasukkan data spesimen

- j. Memasukan *initial speed* dan *secondary speed* (mm/s).
 k. Setelah menginput semua data lalu klik *RUN*.

Untuk menentukan nilai regangan, tegangan dan modulus elastisitas dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut (Callister, 2007):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

E = Modulus elastisitas (N/mm^2)

σ = Tegangan maksimum (N/mm^2)

ε = Regangan

Regangan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\varepsilon = \frac{L_i - L_o}{L_o} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana:

ε = Regangan

L_i = Panjang awal batang uji (mm)

L_o = Panjang batang uji yang dibebani (mm)

Tegangan dapat dihitung dengan rumus:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana:

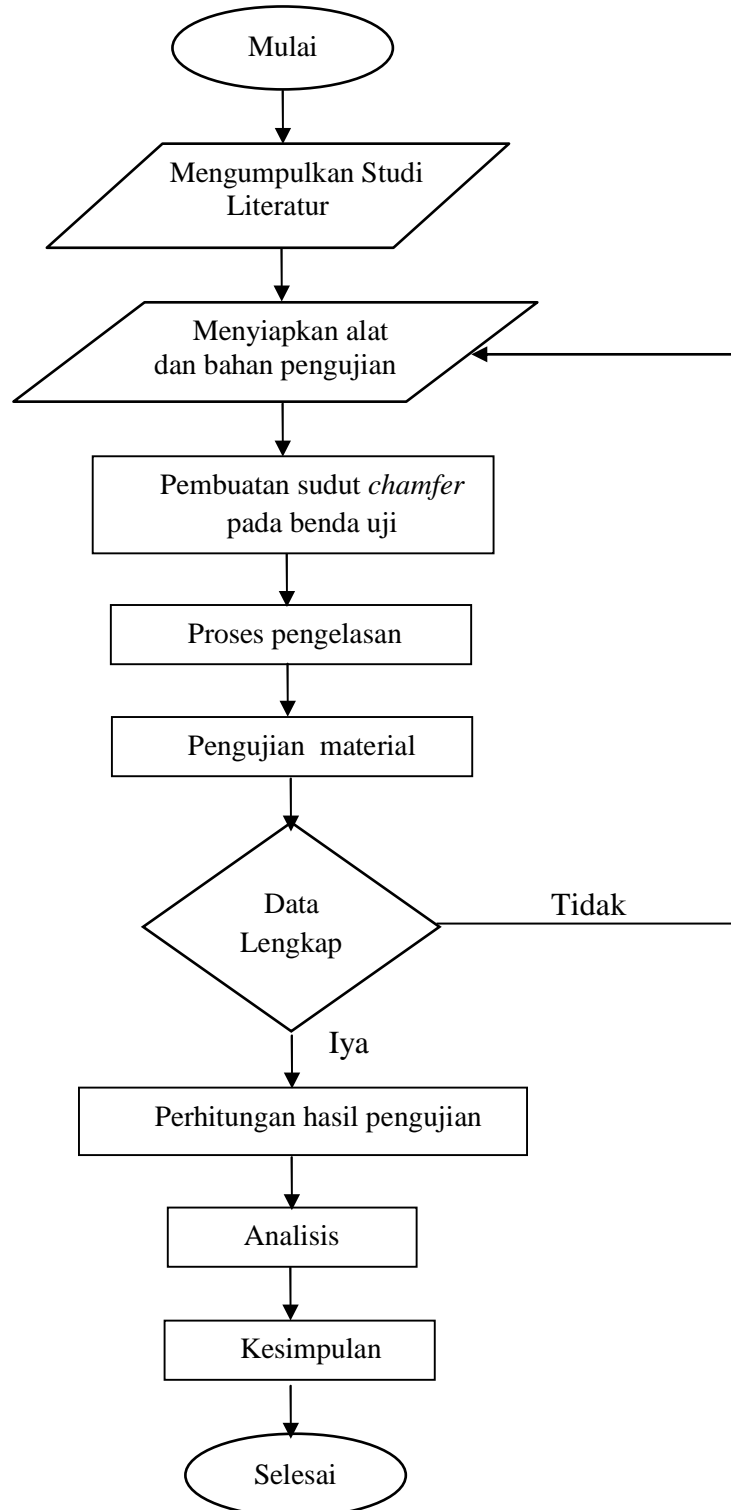
σ = Tegangan (N/mm^2)

F = Beban (N)

A_0 = Luas penampang batang uji (mm^2)

D. Diagram Alir

Diagram penelitian tugas akhir dapat dilihat pada gambar 18.



Gambar 18. Diagram Alir

E. Pengambilan Data

Adapun data yang dibutuhkan dalam penelitian tugas akhir ini ditunjukkan pada Tabel 3 sampai Tabel 6 sebagai berikut.

Tabel 4. Data Tegangan Luluh Uji Tarik

Sudut <i>chamfer</i>	Spesimen	Tegangan Luluh (MPa)	Rata-rata Tegangan Luluh (MPa)
0 ⁰	1		
	2		
15 ⁰	1		
	2		
30 ⁰	1		
	2		
45 ⁰	1		
	2		

Tabel 5. Data Tegangan Maksimum Uji Tarik

Sudut <i>chamfer</i>	Spesimen	Tegangan Maksimum (MPa)	Rata-rata Tegangan Maksimum (MPa)
0 ⁰	1		
	2		
15 ⁰	1		
	2		
30 ⁰	1		
	2		
45 ⁰	1		
	2		

Tabel 6. Data Modulus Elastisitas Uji Tarik

Sudut <i>chamfer</i>	Spesimen	Modulus Elastisitas (GPa)	Rata-rata Modulus Elastisitas (GPa)
0 ⁰	1		
	2		
15 ⁰	1		
	2		
30 ⁰	1		
	2		
45 ⁰	1		
	2		

Tabel 7. Data Struktur Mikro

Jenis Material	No Test	Jenis Perlakuan	Gambar Struktur Mikro
Magnesium AZ-31B	1	<i>Friction Welding</i>	
	2	<i>Friction Welding</i>	

V. PENUTUP

A. Simpulan

Adapun beberapa kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dari hasil pengelasan gesek magnesium AZ-31B dengan variasi sudut *chamfer* 0° , 15° , 30° dan 45° menghasilkan nilai kekuatan tarik yang berbeda-beda. Nilai kekuatan tarik tertinggi yaitu pada spesimen dengan variasi sudut *chamfer* 30° dengan nilai tegangan maksimumnya sebesar 245,875 MPa. Sedangkan yang mempunyai nilai kekuatan tarik terendah yaitu pada spesimen tanpa menggunakan sudut *chamfer* dengan tegangan maksimumnya sebesar 83,722 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan sudut *chamfer* pada spesimen yang akan dilakukan pengelasan gesek akan meningkatkan kekuatan tarik dari magnesium AZ-31B yang disebabkan oleh alur yang dibentuk sudut *chamfer* akan menjadi tempat pengisian logam cair dengan pencampuran yang lebih homogen bila dibandingkan dengan spesimen tanpa sudut *chamfer*.
2. Dari hasil pengujian struktur mikro menunjukkan perubahan fasa dan juga bentuk butir terutama pada daerah las yang jelas terlihat berbeda dibandingkan dengan logam dasarnya. Perubahan fasa yang terjadi dan juga ukuran butir disebabkan oleh pengaruh panas yang dihasilkan dari gesekan kedua material saat pengelasan. Daerah yang terkena panas dari pengelasan akan menyebabkan berubahnya struktur mikro pada magnesium AZ-31B

B. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan penulis terhadap pengujian yang telah dilakukan adalah:

1. Hasil dari penelitian ini masih dapat dikembangkan lagi untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal dengan menggunakan parameter yang lebih bervariasi, baik parameter alat maupun bahan.
2. Pada penelitian selanjutnya untuk dapat melakukan pengujian yang lebih variatif seperti uji kekerasan dan uji impak atau pengujian metalografi lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggoro, A.B., Subagsono. dan Harjanto, B. 2015. “Kualitas Repair Welding Dengan Metode Oksi-Asetilin dan Perlakuan Preheating Pada Cast Wheel Alumunium Sebagai Suplemen Materi Mata Kuliah Teknik Pengelasan”. Prodi. Pendidikan Teknik Mesin, Jurusan Pendidikan Teknik Kejuruan, FKIP, UNS.
- Anis, M., Irsyadi, A. dan Ferdian, D. 2009. “Studi Lapisan Intermetalik Cu3sn Pada Ujung Elektroda Dalam Pengelasan Titik Baja Galvanis”. Makara, Teknologi, Vol. 13, No. 2, November 2009: 91-95.
- Buldum, B.B., Sik, A. dan Ozkul, I. 2011. “Investigation Of Magnesium Alloys Machinability”. International Journal Of Electronics; Mechanical And Mechatronics Engineering Vol.2 Num.3 pp.(261-268).
- Callister, W.D. 2007. “*Materials Science and Engineering*”. Book. Department of Metallurgy Engineering The University of Utah.
- Djamiko, R.D. 2008. “Teori Fabrikasi 2” Jurusan Pendidikan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Yogyakarta.
- Firmansyah, M.R.G., Solichin. dan Puspitasari, Rr.P. 2018. “Analisis Kecepatan Putar, Durasi Gesek dan Tekanan Terhadap Kekuatan Tarik Hasil Pengelasan Gesek (Friction Welding)”. Jurnal Teknik Mesin Dan Pembelajaran Volume 1, Nomor 2, Desember 2018 Halaman: 1 – 5.
- Gama, A.P. 2013. “Analisis Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Alumunium Paduan Seri 6061 Hasil Pengelasan Friction Welding Dengan Variasi Sudut”. Skripsi Program Studi Strata 1 Teknik, jurusan Teknik Mesin, Teknik, Universitas Jember.
- Hutchinson, C.R., Nie, J.F., Gorsse, S. 2005. “*Modeling The Precipitation Processes And Strengthening Mechanisms In A Mg-Al-(Zn) AZ91 Alloy*”. Artikel *Metalurgical and Materials Transactions*. Volume 36A.
- Ibrahim, G.A., Subagio, H., Hamni, A. dan Lestari, S.M.P. 2015. “Analisa Nilai Kekasaran Permukaan Magnesium Az31 Menggunakan Metode Taghuci”. Jurnal Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

- Irawan, Y.S., Wirohardjo, M., Pratama, A., Fuad, M.N. 2008. "Pengaruh Sudut *Chamfer* terhadap Kekuatan Tarik dan Impak Sambungan Las Gesek Aluminium Paduan A6061". Laporan Kegiatan Penelitian, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Brawijaya.
- Irawan Y,S., Suprpto, W., Oerbandono, T., January, A.R., Wijaksonom A.K.M., Fauzan, R. "*Torsion Strength Of Round Bar A6061 Friction Weld Joint Influenced By Friction Time, Upset Force And One Side Cone Geometry*". *Journal of Environmental Engineering & Sustainable Technology*, Vol. 04, No. 02, Faculty of Engineering, Brawijaya University.
- Irwansyah. 2019. "Deteksi Cacat Pada Material Dengan Teknik Pengujian Tidak Merusak". *Lensa* – Vol. 2 No.48, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Pramita Indonesia.
- Ismail dan Wijaya, A.S. 2016. "Analisa Struktur Mikro Terhadap Paduan Al-Cu *Hypereutektik*". *Mekanika Jurnal Teknik Mesin* – Vol.2 No. 1, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945, Surabaya.
- Kainer, K.U. 2003. "Magnesium – *Alloy and Technologies*". Buku. *Institut Fur Werkstofforschung. Germany*.
- Kalpakjian, S. and Schmid, S.R. 2009. "*Manufacturing And Technology*". Buku *Sixth Edition in SI Units*.
- Khan, Md. I. 2007. "*Welding Science And Technology*". *New Age International, Mechanical Engineering Department Faculty of Engineering, Integral University, Lucknow*.
- Naufal, A., Jokosisworo, S. dan Samuel. 2016. "Pengaruh Kuat Arus Listrik Dan Sudut Kampuh V Terhadap Kekuatan Tarik Dan Tekuk Aluminium 5083 Pengelasan GTAW". *Jurnal Teknik Perkapalan* – Vol.4, No. 1, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.
- Prabowo, A., Sukmana, I. dan Burhanuddin, Y. 2017. "Las Gesek (*Friction Welding*) Logam Tidak Sejenis (*Dissimilar Metals*) Magnesium AZ-31 Terhadap Aluminium AL-13". *Industrial Research Workshop and National Seminar*, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
- Purnomo, S. 2016. "Pengaruh Variasi Gesek Terhadap Kualitas Sambungan Pada Pengelasan *Continuous Drive Friction Welding (Cdfw)* Bahan Pipa Kuningan Dan Tembaga". Tugas Akhir. Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Rahmatika, A., Ibrahim, S., Hersaputri, M. dan Aprilia, E. 2019. "Studi Pengaruh Variasi Kuat Arus Terhadap Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Gtaw

- Aluminium 1050 Dengan Filler Er 4043". Jurnal Polimesin Volume 17, Nomor 1, Institut Teknologi dan Sains Bandung.
- Rirismaranggi, S., Syamsuar dan Sumardi. 2019. "Pengaruh variasi arus pengelasan GTAW terhadap sifat mekanik material St 37". *Journal of Welding Technology*. Volume 1, No. 1, Politeknik Negeri Lhokseumawe.
- Sahin, M. 2005. "Joining with friction welding of high-speed steel and medium-carbon steel". *Journal of Materials Processing Technology* 168 (2005) 202–210, Mechanical Engineering Department of Trakya University.
- Sakura, R.R., Junus, S. Jatisukamto, G. dan Septian, R. 2017. "Pengaruh Variasi Waktu Gesek *Friction Welding* Pada Baja Aisi 1045 Dengan Sudut *Chamfer* 15° Terhadap Sifat Mekaniknya". Jurnal Elemen Volume 4 Nomor 2, Universitas Jember.
- Samian. 1999. "Las Busur Listrik". Buku. Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, Padang.
- Santosa, Aa., Suci, F.C. dan Hanifi, R. 2020. "Pengaruh Variasi Arus Listrik Pada Pengelasan *Flash Butt Welding* Terhadap Kekuatan Tarik". Infomatek Volume 22 Nomor 1, Universitas Singaperbangsa Karawang.
- Santoso, E.B., Irawan, Y.S. dan Sutikno, E. 2012. "Pengaruh Sudut *Chamfer* Dan Gaya Tekan Akhir Terhadap Kekuatan Tarik Dan Porositas Sambungan Las Gesek Pada Paduan Al-Mg-Si". Jurnal Rekayasa Mesin Vol.3, No. 1, Universitas Brawijaya.
- Sanyoto, B.L., Husodo, N., Setyawati, S.B. dan Mursid, M. 2012. "Penerapan Teknologi Las Gesek (*Friction Welding*) Dalam Proses Penyambungan Dua Buah Pipa Logam Baja Karbon Rendah". Jurnal Energi dan Manufaktur Vol.5, No.1, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya-Indonesia.
- Saputra, A.A. 2017. "Analisis Pengelasan *Friction Welding* Magnesium AZ31 Menggunakan Aplikasi Thermografi". Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Satyadianto, D. 2015. "Pengaruh Variasi Tekanan Gesek, Tekanan Tempa Dan Durasi Gesek Terhadap Kekuatan Impact Pada Sambungan Las Gesek (*Friction Welding*) Dengan Menggunakan Baja Paduan Aisi 4140". Tugas Akhir. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Setiawan, F. 2014. "Karakterisasi Penyalaan Magnesium AZ31 Pada Proses Bubut Menggunakan Aplikasi Thermografi". Skripsi. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung, Lampung.

- Solihin., Sukmana, I., dan Ummah, K. 2017. "Pengaruh waktu kontak terhadap kualitas sambungan hasil las gesek (*Friction Welding*) Magnesium AZ-31". Jurnal Energi dan Manufaktur Vol. 10 No. 1, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Sugianto, H.W. 2016. "Pengaruh Waktu Gesek Dan Sudut *Chamfer* Terhadap Sifat Mekanik Hasil Lasan Aluminium 6061 Pada Proses *Friction Welding*". Skripsi. Program Studi Strata Satu Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember.
- Tewan, J.R.J. 2019. "Pengaruh *Friction Time* dan Diameter Gesek Baja Terhadap Kekuatan Tarik Hasil Sambungan Las Gesek *Continuous Drive* A6061 Dan S50C". Skripsi. Teknik Mesin, Universitas Brawijaya.
- Tony, F. 2005. "*Instron 5582 Universal Tester*". Berisikan *Safety, Background, Operation*.
- Ugender, S. and Kumar, A. 2014. "*Microstructure and Mechanical Properties of AZ31B Magnesium Alloy by Friction stir Welding*". *Research Scholar. Department of Mechanical Engineering, JNTU, India*.
- Wirjosumarto, H. dan Okumura, T. 2000. "Teknologi Pengelasan Logam". Buku Cetakan ke Delapan. PT Pradnya Paramita, Jakarta.