



**PENGARUH PENGELASAN *FLUX CORED ARC WELDING*  
(FCAW) DENGAN VARIASI PLATE TERHADAP  
KEKERASAN UJI *BENDING* DAN KEKUATAN TARIK PAD  
TUMBLER *EXCAVATOR* HITACHI 3600**

**SKRIPSI**

Diajukan Sebagai Syarat Dalam Rangka Penyelesaian Studi  
Untuk mencapai Gelar Sarjana Teknik  
Program Studi Teknik Mesin  
Jenjang Strata Satu (S1)

Oleh :

**MUHAMMAD IHSAN NUGROHO  
NPM.6420600083**

**FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER  
UNIVERSITAS PANCASAKTI TEGAL  
2025**

## LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI

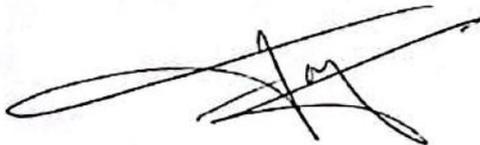
Skripsi yang berjudul “PENGARUH PENGELASAN *FLUX CORED ARC WELDING* (FCAW) DENGAN VARIASI PLATE TERHADAP KEKERASAN UJI *BENDING* DAN KEKUATAN TARIK PAD TUMBLER *EXCAVATOR HITACHI 3600*”

NAMA PENULIS : MUHAMMAD IHSAN NUGROHO  
NPM : 6420600083

Telah disetujui oleh dosen pembimbing untuk dipertahankan dihadapan sidang dewan penguji skripsi Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal.

Hari : Jum'at  
Tanggal : 24 Januari 2025

**Pembimbing I**



**M Fajar Sidiq M.Eng.,S.T**  
NIP :197908082005011001

**Pembimbing II**



**Hadi Wibowo, ST.MT**  
NIPY : 20651641971

## HALAMAN PENGESAHAN

Telah dipertahankan dihadapan sidang Dewan Penguji Skripsi Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal

Pada hari : Jum'at

Tanggal : 24 Januari 2025

### Ketua Penguji:

Rusnoto, ST.M.Eng.  
NIPY 14054121974

  
.....

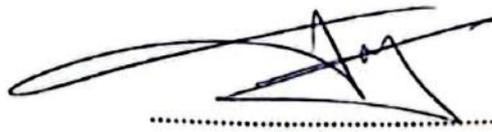
### Penguji Utama:

Ahmad Farid, ST.MT.  
NIPY 191511101978

  
.....

### Penguji 1:

M.Fajar Sidiq, ST.M.Eng.  
NIP 197908082005011001

  
.....

### Penguji 2:

Hadi Wibowo, ST.MT.  
NIPY 20651641971

  
.....

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer



Dr. Agus Wibowo, ST.MT.  
NIPY: 126518101972

## HALAMAN PERNYATAAN

Dengan ini, saya menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "**PENGARUH PENGELASAN *FLUX CORED ARC WELDING (FCAW)* DENGAN VARIASI PLATE TERHADAP KEKERASAN, UJI *BENDING*, DAN KEKUATAN TARIK PADA TUMBLER *EXCAVATOR* HITACHI 3600**" dan seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Dalam penulisan skripsi ini, saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika yang berlaku dalam masyarakat keilmuan sebagaimana mestinya.

Demikian pernyataan ini dibuat sebagai pedoman bagi yang berkepentingan, dan saya siap menanggung segala risiko dan sanksi yang diberikan kepada saya apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran atas etika keilmuan dalam karya tulis ini, atau adanya klaim atas karya tulis ini.

Tegal, Jum'at 24 Januari 2025



Muhammad Ihsan Nugroho

## MOTO DAN PERSEMBAHAN

### MOTTO:

1. Jangan malu untuk belajar, karena belajar tidak mengenal usia, **BELAJAR** itu bukan tentang bisa atau tidak, tapi mau atau tidak.
2. Setiap hari adalah kesempatan untuk **BELAJAR** dan tumbuh, dan Pengalaman adalah Guru Terbaik.
3. Jangan Menunda Pekerjaan  
Dua nikmat Allah yang kebanyakan manusia sering lalai didalamnya yaitu: kesehatan dan kesempatan (*HR. Bukhari*)
4. Sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan (*QS. Al-Insyirah: 6*)
5. Ada dua aturan untuk menjadi sukses, pertama cari tahu hal yang ingin Anda lakukan, kedua lakukan hal tersebut. (*Mario Cuomo*)
6. If you cant fly, then run  
If you cant run, then walk  
If you cant walk, then crawl  
But whatever you do  
You have to keep moving forward. (*Marthin Luther King Jr*)
7. Stay focus and complete the journey.  
Jadilah pemberani, ambil Langkah pertamamu dalam **BELAJAR** dengan semangat selesaikan dan tuntaskan.

### PERSEMBAHAN

Skripsi ini penulis persembahkan untuk:

1. Ibu, Ibu, Ibu...dan Bapakku (Alm.Trusno BA dan Supinah)
2. Istriku Tercinta (Eka Sari Handayani)
3. Buah Hati kami motivasi terbesar penulis (Ananda Reza Sani Az Dzaky)
4. Adek-Adeku tersayang, dan keluargaku yang jadikan penulis menjadi kuat dan tangguh terimakasih untuk semua pelajaran hidupnya.
5. Almamater Tercinta UPS Tegal.

## KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puja dan puji syukur kehadirat Allah SWT, sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal skripsi ini dengan judul “Pengaruh Pengelasan *Flux cored Arc Welding* (FCAW) dengan Variasi Plate terhadap kekerasan uji banding dan kekuatan tarik Pad *Tumbler* Exavator Hitachi 3600”. Penyusunan proposal skripsi ini dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat dalam rangka menyelesaikan studi strata Program Studi Teknik Mesin.

Dalam penyusunan dan penulisan proposal skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan bimbingan berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Dr. Taufiqulloh, M. Hum. selaku Rektor Universitas Panca Sakti Tegal;
2. Dr. Agus Wibowo, ST., MT. selaku Dekan Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal;
3. Bapak M Fajar Sidiq, M. Eng S.T selaku Dosen Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal, sekaligus Dosen Pembimbing I;
4. Bapak Hadi Wibowo, ST. MT selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin dan Ilmu Komputer Fakultas Teknik Universitas Pancasakti Tegal sekaligus Dosen pembimbing II;
5. Segenap Dosen dan Staff Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal;
6. Kedua orang tua dan Istri saya yang senantiasa selalu mendukung dan selalu mendoakan saya dalam melaksanakan kuliah sampai dengan penyusunan proposal skripsi ini;
7. Teman teman Mahasiswa Reguler maupun Konversi yang telah memberikan dukungan dan semangat untuk segera menyelesaikan penyusunan materi Sempro ini;

8. Rekan-rekan Mechanic,Foremen,Supervisor,Superintendent,Manager dan PJO (Penanggung Jawab Operasional) saya di PT BUMA site Lati dan BIN Berau Kaltim yang selalu memberikan support serta masukannya,
9. Dan semua pihak yang telah membantu sehingga Materi Seminar Proposal ini dapat di selesaikan,semoga bantuan,bimbingan yang telah diberikan kepada saya menjadi catatan positif sebagai Amal Ibadah untuk semuanya, serta mendapatkan balasan yang terbaik dari Alloh Subhanna Wata'ala.

Penulis telah mencoba membuat proposal sesempurna mungkin, namun demikian tentunya kritik,saran dan masukan kami harapkan untuk menyempurnakan. Harapan penulis, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Aamiin.

Tegal, Jum'at 24 Januari 2025

( M Ihsan Nugroho )

## ABSTRAK

Muhammad Ihsan Nugroho, 2024. “Pengaruh Pengelasan *Flux cored Arc Welding (FCAW)* dengan Variasi Plate terhadap Kekerasan, Uji *Bending*, dan Kekuatan Tarik pada *Tumbler Excavator Hitachi 3600*.” Laporan Skripsi Teknik Mesin Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer Universitas Pancasakti Tegal 2024.

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan untuk meningkatkan durabilitas dan performa material *tumbler* pada *Excavator Hitachi 3600*, khususnya dalam konteks pengelasan perbaikan yang melibatkan material dengan karakteristik kekerasan yang berbeda. *Tumbler* pada *excavator* berperan penting dalam operasional alat berat, sehingga pemilihan metode pengelasan dan material yang tepat sangat krusial untuk memastikan keandalan dan ketahanan komponen yang dilas. Masalah utama yang dikaji dalam penelitian ini adalah bagaimana variasi material plate dan penggunaan metode pengelasan FCAW dengan *flux core 81 T* mempengaruhi sifat mekanik, termasuk kekerasan, kekuatan tarik, dan resistensi terhadap deformasi lentur (*bending*) dari material *tumbler*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi kombinasi material dan metode pengelasan yang memberikan hasil terbaik dalam hal kekuatan tarik, tegangan *bending*, dan kekerasan material pasca-pengelasan. Lingkup kajian ini mencakup analisis tiga jenis material, yakni ASTM A36/ HB 111, HB 255, dan HB 400, yang diuji melalui serangkaian pengujian tarik, *bending*, dan kekerasan Brinell.

Metodologi penelitian melibatkan pengujian eksperimental di laboratorium, menggunakan spesimen yang disiapkan sesuai standar ASTM E8 untuk pengujian tarik, ASTM E290 untuk pengujian *bending*, dan ASTM E10 untuk pengujian kekerasan Brinell. Pengujian dilakukan dengan *Universal Testing Machine (UTM)* dan mesin uji kekerasan Brinell di Laboratorium Bahan Teknik Universitas Gadjah Mada pada tanggal 6 Agustus 2024. Data yang diperoleh dianalisis untuk mengidentifikasi pengaruh masing-masing variasi material dan metode pengelasan terhadap sifat mekanik yang diuji.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa material HB 400 memberikan kekuatan tarik tertinggi dengan nilai rata-rata 707,1 MPa, diikuti oleh HB 255 dengan kekuatan tarik rata-rata 672,3 MPa, dan ASTM A36/ HB 111 dengan nilai terendah sebesar 473,7 MPa. Pengujian *bending* menunjukkan bahwa HB 255 memiliki tegangan *bending* tertinggi dengan rata-rata 825,22 MPa, sementara HB 400 dan ASTM A36/ HB 111 masing-masing menunjukkan nilai rata-rata 859,04 MPa dan 662,99 MPa. Pengujian kekerasan Brinell menunjukkan bahwa material HB 255 memiliki kekerasan tertinggi di area HAZ dengan nilai rata-rata 277,14 BHN, sementara HB 400 dan ASTM A36/ HB 111 menunjukkan nilai yang lebih rendah. Kesimpulannya, *flux core 81 T* efektif dalam meningkatkan sifat mekanik material dengan kekerasan tinggi seperti HB 400, namun juga mempengaruhi kekerasan material di area HAZ, terutama pada material dengan kekerasan yang lebih rendah. Material HB 400 direkomendasikan untuk aplikasi yang membutuhkan kombinasi optimal antara kekuatan tarik dan kekerasan, terutama dalam pengelasan perbaikan komponen berat seperti *tumbler* pada *Excavator Hitachi 3600*.

**Kata kunci:** Uji *Bending*, *Flux cored* Arc Welding (FCAW), Uji Kekerasan, Uji kekuatan tarik.

## ABSTRACT

Muhammad Ihsan Nugroho, 2024. “**The Influence of *Flux cored* Arc Welding (FCAW) with Plate Variation on Hardness, *Bending* Test, and Tensile Strength of *Excavator Hitachi 3600 Tumbler*.**” Bachelor’s Thesis in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Computer Science, Universitas Pancasakti Tegal, 2024.

This research is motivated by the need to enhance the durability and performance of *tumbler* materials in the Hitachi 3600 *Excavator*, especially in the context of repair welding involving materials with different hardness characteristics. The *tumbler* plays a crucial role in the operation of heavy machinery, making the selection of appropriate welding methods and materials critical to ensuring the reliability and durability of the welded components. The main problem addressed in this study is how the variation of plate materials and the use of FCAW welding method with *flux core* 81 T affects the mechanical properties, including hardness, tensile strength, and resistance to *bending* deformation of the *tumbler* material. The objective of this research is to identify the combination of materials and welding methods that provide the best results in terms of tensile strength, *bending* stress, and material hardness after welding. The scope of this study includes the analysis of three types of materials, namely ASTM A36/ HB 111, HB 255, and HB 400, tested through a series of tensile, *bending*, and Brinell hardness tests.

The research methodology involved experimental testing in the laboratory, using specimens prepared according to ASTM E8 standards for tensile testing, ASTM E290 for *bending* testing, and ASTM E10 for Brinell hardness testing. The tests were conducted using a *Universal Testing Machine* (UTM) and Brinell hardness testing machine at the Materials Engineering Laboratory, Universitas Gadjah Mada, on August 6, 2024. The data obtained were analyzed to identify the impact of each material variation and welding method on the tested mechanical properties.

The results of the study indicate that HB 400 material provides the highest tensile strength with an average value of 707.1 MPa, followed by HB 255 with an average tensile strength of 672.3 MPa, and ASTM A36/ HB 111 with the lowest value of 473.7 MPa. The *bending* test results show that HB 255 has the highest *bending* stress with an average of 825.22 MPa, while HB 400 and ASTM A36/ HB 111 show average values of 859.04 MPa and 662.99 MPa, respectively. Brinell hardness testing revealed that HB 255 material has the highest hardness in the Heat Affected Zone (HAZ) with an average value of 277.14 BHN, while HB 400 and ASTM A36/ HB 111 exhibited lower values. In conclusion, *flux core* 81 T is effective in enhancing the mechanical properties of high-hardness materials like HB 400, but it also impacts the hardness of the material in the HAZ, particularly in materials with lower hardness. HB 400 material is recommended for applications that require an optimal combination of tensile strength and hardness, especially in the repair welding of heavy components such as the *tumbler* in the Hitachi 3600 *Excavator*.

**Keywords:** *Bending test, Flux cored Arc Welding (FCAW), Hardness Test, Tensile Strenght Test.*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI</b> .....	ii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iv
<b>MOTO DAN PERSEMBAHAN</b> .....	v
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>ABSTRAK</b> .....	viii
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xvi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvii
<b>LAMBANG DAN SINGKATAN</b> .....	xviii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
A. Latar Belakang .....	1
B. Batasan Masalah.....	5
C. Rumusan Masalah .....	6
D. Tujuan Penelitian .....	7
E. Manfaat Penelitian .....	7
F. Sistematika Penulisan .....	9
<b>BAB II LANDASAN TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	11
A. Landasan Teori.....	11
1. Pengertian Baja dan Jenis jenis Baja.....	11
2. Pengertian pengelasan dan klasifikasi metode pengelasan. ....	16

3. Jenis Proses Pengelasan .....	21
4. Material Pengelasan .....	41
5. Kekerasan Material .....	53
6. Kekuatan Tarik.....	64
7. Pengelasan <i>Repair pad</i> pada Alat Berat.....	68
8. Uji <i>Bending</i> .....	70
B. Tinjauan Pustaka.....	75
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>78</b>
A. Metode Penelitian.....	78
B. Waktu dan Tempat Penelitian .....	78
C. Instrumen Penelitian dan Desain Pengujian.....	79
D. Variabel Penelitian .....	86
E. Diagram Alir Penelitian .....	87
F. Metode Pengumpulan Data.....	89
G. Metode Analisis Data.....	90
1. Uji Tarik.....	90
2. Uji <i>Bending</i> .....	91
3. Uji Kekerasan.....	91
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>92</b>
A. Hasil Penelitian .....	92
1. Pengujian Tarik .....	92
2. Pengujian <i>Bending</i> .....	107
3. Pengujian Kekerasan.....	118
B. Pembahasan.....	146
1. Pengujian Tarik .....	146

2. Pengujian <i>Bending</i> .....	150
3. Pengujian Kekerasan .....	153
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	160
A. Kesimpulan .....	160
B. Saran.....	161
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	163
<b>LAMPIRAN</b> .....	169

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Hasil Baja .....	16
Tabel 2. 2 Perbandingan kekerasan material ASTM A36/HB 111, HB 255, dan HB 400.....	63
Tabel 2. 3 <i>Three point bending</i> (Khamid, 2011) .....	73
Tabel 2. 4 <i>Four point bending</i> (Khamid, 2011).....	74
Tabel 3. 1 Variabel Penelitian .....	86
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Tarik.....	93
Tabel 4.2 Hasil Pengujian <i>Bending</i> .....	109
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kekerasan <i>Brinell</i> pada material.....	120
Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Kekerasan <i>Brinell</i> pada material Tumbler dan HB 255 .....	129
Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kekerasan <i>Brinell</i> pada material Tumbler dan HB 400 .....	137

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Chemical Competition Plat Baja HB 255.....	14
Gambar 2. 2 Chemical Competition Plat Baja HB 400.....	15
Gambar 2. 3 Chemical Competition Plat Baja ASTM A36/HB 111 .....	15
Gambar 2. 4 Pengelasan Fusi (Weber & Göklü, 2006).....	18
Gambar 2. 5 Shielded metal arc welding (SMAW) .....	22
Gambar 2. 6 Submerged Arc Welding .....	27
Gambar 2. 7 Laser Beam Welding .....	33
Gambar 2. 8 Pengelasan gas oksifuel.....	36
Gambar 2. 8 Perbandingan kekerasan material ASTM A36/HB 111, HB 255, dan HB 400 .....	62
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	76
Gambar 4. 1 Mesin Uji Tarik .....	92
Gambar 4. 2 Hasil Variasi Spesimen .....	93
Gambar 4. 3 Mesin Uji <i>Bending</i> .....	108
Gambar 4. 4 Hasil Uji <i>Bending</i> .....	109
Gambar 4. 5 Mesin Uji Kekerasan Brinell.....	119
Gambar 4. 6 Grafik rata - rata tegangan tarik .....	146
Gambar 4. 7 Spesimen Tegangan Tarik sebelum dan setelah di uji .....	147
Gambar 4. 8 Grafik rata - rata tegangan <i>bending</i> .....	151
Gambar 4. 9 Spesimen Hasil Uji <i>Bending</i> .....	151
Gambar 4. 10 Diagram rata - rata kekerasan pengelasan material.....	154

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Uji Tarik .....	169
Lampiran 2 Dokumentasi Uji <i>Bending</i> .....	173
Lampiran 3 Dokumentasi Uji Kekerasan .....	175
Lampiran 4 Informasi Pengelas.....	178
Lampiran 5 Hasil Uji Lab.....	181

## LAMBANG DAN SINGKATAN

$\sigma$	Tegangan tarik (Tensile stress), diukur dalam Megapascal (MPa).
$\varepsilon$	Regangan (Strain), diukur dalam persen (%).
BHN	Brinell Hardness Number, satuan untuk kekerasan material yang diuji dengan metode Brinell.
Pmax	Beban maksimum (Maximum Load), diukur dalam Kilonewton (KN).
$\Delta L$	Perubahan panjang spesimen (Change in Length), diukur dalam milimeter (mm).
A	Luas penampang (Cross-sectional Area), diukur dalam milimeter persegi (mm <sup>2</sup> ).
UTM	<i>Universal Testing Machine</i> , mesin yang digunakan untuk pengujian tarik dan <i>bending</i> .
FCAW	<i>Flux cored Arc Welding</i> , metode pengelasan dengan menggunakan kawat elektroda yang berisi flux.
HAZ	Heat Affected Zone, daerah yang terpengaruh panas pada material yang dilas.
MPa	Megapascal, satuan untuk tegangan (1 MPa = 1 N/mm <sup>2</sup> ).
kgf	Kilogram-force, satuan beban yang digunakan dalam pengujian kekerasan Brinell.
ASTM	American Society for Testing and Materials, organisasi yang menetapkan standar internasional untuk pengujian dan spesifikasi material.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang

Dalam industri konstruksi dan pertambangan, *excavator* merupakan peralatan kunci yang berperan penting dalam berbagai operasi (Setiawan et al., 2020). Keandalan dan efisiensi *excavator*, khususnya model seperti *Excavator Hitachi 3600*, secara langsung mempengaruhi produktivitas dan keselamatan di lapangan (Ito et al., 2021; Sinclair & Nehring, 2019). Seiring waktu, komponen-komponen penting seperti *repair pad Tumbler* mengalami keausan dan kerusakan, memerlukan perbaikan yang efektif dan tahan lama (PT Hexindo Adiperkasa, 2020).

Laporan oleh PT. Hexindo Adiperkasa Tbk. pada tahun 2022 menunjukkan bahwa umur rata-rata perbaikan tumbler *excavator* dengan teknik pengelasan konvensional mencapai 5 tahun, namun dapat meningkat hingga 7 tahun dengan penggunaan metode pengelasan yang lebih baru dan inovatif (Hexindo, 2022). Sementara itu, Asosiasi Industri Konstruksi dan Pertambangan Indonesia mencatat biaya perawatan dan perbaikan *excavator* yang cukup signifikan, dengan rata-rata Rp 1 miliar per tahun, bergantung pada berbagai faktor seperti ukuran dan jenis *excavator*, serta tingkat kerusakan yang dialami. Lebih lanjut, penelitian dari Universitas Brawijaya pada tahun 2021 mengungkap bahwa jenis kegagalan pengelasan yang paling umum pada Tumbler *excavator* adalah kebocoran, retak,

dan delaminasi, dengan kebocoran terjadi sebesar 40%, retak 30%, dan delaminasi 20%. Tren industri saat ini bergerak ke arah penggunaan material dan teknik pengelasan yang lebih kuat dan tahan lama untuk meningkatkan durabilitas *excavator* dan mengurangi biaya perawatan (Júnior et al., 2020; Sitthipong et al., 2017). Kekerasan material yang biasa digunakan dalam perbaikan Tumbler *excavator* adalah ASTM A36/HB 111 dan HB 255, sementara material dengan kekerasan di atas HB 400 mulai banyak digunakan untuk kebutuhan yang memerlukan kekuatan dan ketahanan tinggi. Informasi ini menyoroti pentingnya penelitian yang bertujuan untuk mengoptimalkan metode perbaikan Tumbler *excavator*, yang tidak hanya berdampak pada pengurangan biaya operasional tetapi juga pada peningkatan keamanan dan keandalan peralatan.

*Excavator*, sebagai alat berat yang krusial dalam operasi ini, harus mematuhi standar keselamatan dan kesehatan kerja (K3) yang ketat. Berdasarkan Peraturan Menteri Tenaga Kerja nomor 8 Tahun 2020, semua aspek pengoperasian alat berat, termasuk *excavator*, dari perencanaan hingga pemeliharaan dan perbaikan, diatur untuk memastikan keselamatan maksimal. Fokus penelitian ini adalah pada proses perbaikan Tumbler *excavator*, komponen kritis yang berpengaruh langsung terhadap kinerja dan keamanan alat berat. Mengingat konsekuensi signifikan dari kegagalan *tumbler*, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi metode pengelasan terbaik yang tidak hanya memperpanjang umur operasional tumbler tetapi juga mempertahankan integritas strukturalnya. Ini sangat penting untuk menjamin

operasi yang aman dan efisien pada *excavator* di lingkungan kerja yang menantang.

Melalui penelitian ini, peneliti berusaha untuk mengisi gap dalam literatur yang ada dengan mengeksplorasi penggunaan *flux core* 81 T dan pengaruhnya pada kekerasan hasil pengelasan, menggunakan variasi plate dengan kekerasan ASTM A36/ HB 111, HB 255 dan HB 400. Penelitian ini tidak hanya memberikan wawasan tentang metode pengelasan yang paling efektif untuk perbaikan Tumbler tetapi juga memberikan kontribusi penting terhadap praktik K3 di industri terkait. Peneliti berkomitmen untuk memastikan bahwa hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh praktisi industri untuk meningkatkan keamanan, efisiensi, dan keberlanjutan dalam penggunaan *excavator* dan alat berat serupa.

Peneliti akan menggunakan metode replace variasi plate dengan penggunaan *flux core* 81 T untuk mengkaji perbaikan Tumbler pada *Excavator* Hitachi 3600 (Kementrian Ketenagakerjaan RI, 2018). Metode ini melibatkan penggantian komponen yang rusak pada Tumbler dengan plate baja yang memiliki variasi tingkat kekerasan, yaitu ASTM A36/ HB 111, HB 255 dan HB 400. Variasi ini dipilih untuk memahami bagaimana perbedaan kekerasan material dapat mempengaruhi kualitas dan durabilitas hasil pengelasan. Dalam proses pengelasan, penggunaan *flux core* 81 T, yang merupakan jenis kawat las flux-cored, menjadi kunci utama. Kawat las ini dipilih karena keunggulannya dalam menghasilkan sambungan las yang kuat dengan penetrasi yang baik, serta efisiensi material yang tinggi. Selain itu, *flux core* 81 T dikenal dapat mengurangi potensi cacat pengelasan, seperti porositas atau retakan.

Pemilihan metode ini didasarkan pada beberapa pertimbangan penting. Pertama, metode ini relevan dengan tantangan yang dihadapi dalam perawatan dan perbaikan alat berat di industri konstruksi dan pertambangan. Dengan memahami pengaruh variasi kekerasan plate terhadap hasil pengelasan, penelitian ini bertujuan untuk memberikan wawasan tentang material yang paling cocok untuk berbagai kondisi operasional. Kedua, metode ini diharapkan dapat meningkatkan durabilitas perbaikan Tumbler, yang dapat mengurangi frekuensi perbaikan dan biaya operasional secara keseluruhan. Ketiga, pemilihan metode pengelasan yang menghasilkan kekuatan dan keandalan tinggi sangat penting untuk memastikan bahwa perbaikan Tumbler mematuhi standar keselamatan dan kesehatan kerja yang telah ditetapkan. Terakhir, metode ini juga dipilih karena potensinya dalam memperluas pengetahuan teknis mengenai pengaruh berbagai tingkat kekerasan material dan teknik pengelasan pada kinerja Tumbler *excavator*. Keseluruhan pendekatan ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi berbasis bukti yang dapat digunakan oleh praktisi industri untuk melakukan perbaikan Tumbler *excavator* yang lebih efektif, efisien, dan aman.

Pada konteks ini, penelitian ini akan berfokus pada metode pengelasan yang digunakan untuk perbaikan Tumbler, khususnya pengaruh penggunaan *flux core* 81 T dan variasi kekerasan plate (ASTM A36/HB 111, HB 255 dan HB 400) terhadap tingkat kekerasan dan kekuatan tarik hasil pengelasan. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi praktek pengelasan terbaik yang tidak hanya memperpanjang umur operasional Tumbler tetapi juga mempertahankan

integritas strukturalnya, yang sangat penting untuk menjamin operasi yang aman dan efisien pada *excavator* di lingkungan kerja yang menantang.

## **B. Batasan Masalah**

Adapun masalah penelitian ini dibatasi pada lingkup berikut ini.

1. Jenis Pengelasan: Penelitian ini menggunakan metode pengelasan flux-cored arc welding (FCAW) dengan kawat las *flux core* 81 T. Pengelasan dilakukan dengan tiga tahap, yaitu rootpass, fillpass, dan capping. Setiap tahap menggunakan konfigurasi tegangan dan arus listrik yang spesifik, yaitu 22,8 V dan 144 A untuk root pass, 25,1 V dan 148 A untuk fill pass, serta 27,8 V dan 154 A untuk capping. Proses root pass memerlukan waktu sekitar 1 menit, sementara fill pass dan capping masing-masing memerlukan waktu ½ menit.
2. Pengelasan dalam penelitian ini dilakukan oleh satu orang yang sudah memiliki sertifikat kompetensi dari Badan Nasional Sertifikasi Profesi (BNSP). Pengelasan dilakukan oleh seorang welder dengan sertifikasi SMAW/FCAW 6G dan OSH Professional, Level I, yang memastikan bahwa seluruh proses pengelasan dilakukan oleh tenaga yang berkompeten sesuai standar nasional. Sertifikat ini menjamin bahwa prosedur pengelasan dilaksanakan dengan keahlian yang sesuai dengan persyaratan teknis yang diperlukan dalam penelitian ini.
3. Spesifikasi Material dan Dimensi: Material yang digunakan memiliki panjang joint 12 cm, lebar 10 cm, dan tebal 10 mm. Variasi material yang digunakan mencakup ASTM A36/ HB 111 (*Mild Steel*/Baja Karbon rendah), HB 255 (*Alloy Steel*/Baja Paduan), dan HB 400 (*Alloy Steel*/Baja

Paduan) untuk mengamati pengaruh kekerasan material terhadap kualitas hasil pengelasan.

4. Jenis Sambungan: Jenis sambungan yang digunakan dalam penelitian ini adalah butt joint kampuh Bevel-Groove, yang dipilih karena sering digunakan dalam perbaikan *tumbler Excavator Hitachi 3600* dan memudahkan perbandingan hasil pengelasan dengan variasi material yang berbeda.
5. Semua pengujian dilakukan sesuai dengan standar :
  - a. Pengujian Tarik (Tensile Strength Test) menggunakan ukuran standart ASTM E8, dengan pengujian *Universal Testing Machine*, Dimensi P = 200 mm, L = 50 mm dan Tebal = 10 mm. Dilakukan di Lab. Bahan Teknik UGM Yogyakarta.
  - b. Pengujian *Bending (Bending Test)* standard spesiment menggunakan ASTM E290, Pengujian menggunakan *Universal Testing Machine*, Dimensi P = 152 mm, L = 12,5 mm dan Tebal = 10 mm. Dilakukan di Lab. Bahan Teknik UGM Yogyakarta.
  - c. Pengujian Kekerasan (Hardness test) Menggunakan Standard ASTM E10, Menggunakan metode Brinnel, Dimensi P = 30 mm, L = 50 mm, Tebal = 10 mm. Dilakukan di Lab. Bahan Teknik UGM Yogyakarta.

### C. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh pengelasan *Flux core 81 T* dengan variasi Plate dan Original material terhadap kekuatan Tarik pada Repair nok *Tumbler Excavator Hitachi 3600*?

2. Bagaimana pengaruh pengelasan *flux core* 81 T dengan variasi Plate dan Original material pada uji *bending* hasil *repair nok pad* Tumbler *Excavator* Hitachi 3600?
3. Bagaimana pengaruh pengelasan *flux core* 81 T dengan variasi plate dan original material pada tingkat kekerasan *repair nok pad* Tumbler *Excavator* Hitachi 3600?

#### **D. Tujuan Penelitian**

1. Mengetahui pengaruh pengelasan *Flux core* 81 T dengan variasi plate dan Original material terhadap kekuatan Tarik pada Repair nok Tumbler *Excavator* Hitachi 3600
2. Mengetahui pengaruh pengelasan *flux core* 81 T dengan variasi plate dan Original material pada uji *bending* hasil *repair nok* Tumbler *Excavator* Hitachi 3600
3. Mengetahui pengaruh pengelasan *flux core* 81 T dengan variasi plate dan Original material pada tingkat kekerasan hasil *repair nok pad* Tumbler *Excavator* Hitachi 3600.

#### **E. Manfaat Penelitian**

1. Manfaat Teoritis
  - a. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teori dan pengetahuan dalam bidang teknik pengelasan, khususnya terkait dengan penggunaan *flux core* 81 T dan pengaruh variasi kekerasan material plate. Hasil penelitian akan memperkaya literatur akademik dengan data empiris dan analisis tentang bagaimana faktor-faktor ini mempengaruhi kualitas dan kekuatan pengelasan.

- b. Penelitian ini memberikan wawasan teoritis tentang karakteristik berbagai jenis material plate (ASTM A36/HB 111, HB 255 dan HB 400) dan bagaimana mereka berinteraksi dengan teknik pengelasan tertentu. Ini akan memperluas pemahaman tentang prinsip-prinsip material science dalam konteks aplikasi praktis.
- c. Hasil penelitian dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap ilmu material dan mekanika, terutama dalam konteks pemilihan material dan teknik pengelasan yang optimal untuk alat berat.

## 2. Manfaat Praktis

- a. Dengan memahami pengaruh teknik pengelasan dan variasi kekerasan material, industri konstruksi dan pertambangan dapat mengadopsi metode yang lebih efektif untuk perbaikan Tumbler *excavator*. Hal ini dapat meningkatkan durabilitas dan keandalan komponen yang diperbaiki.
- b. Hasil penelitian ini dapat membantu perusahaan dalam mengurangi biaya dan waktu yang dibutuhkan untuk perawatan dan perbaikan, dengan menerapkan metode pengelasan yang lebih efisien dan efektif.
- c. Dengan memperbaiki Tumbler *excavator* secara lebih efektif, penelitian ini berkontribusi pada peningkatan keselamatan kerja. Perbaikan yang lebih tahan lama dan kuat berarti ada risiko yang lebih rendah dari kegagalan komponen, yang secara langsung meningkatkan keselamatan di tempat kerja.
- d. Keputusan Berbasis Bukti untuk Industri: Hasil penelitian ini dapat membantu pengambil keputusan di industri terkait untuk membuat

pilihan berbasis bukti tentang teknik pengelasan dan material yang digunakan, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi operasional.

## **F. Sistematika Penulisan**

### **1. BAB I: PENDAHULUAN**

Latar Belakang: Paparan mendalam mengenai konteks dan pentingnya penelitian.

Pembahasan atas fenomena yang diobservasi dan alasan pemilihan topik.

Rumusan Masalah: Identifikasi dan formulasi masalah yang menjadi fokus penelitian.

Tujuan Penelitian: Pernyataan yang jelas mengenai apa yang ingin dicapai melalui penelitian.

Manfaat Penelitian: Deskripsi bagaimana hasil penelitian dapat memberi kontribusi teoritis dan praktis.

### **2. BAB II: TINJAUAN PUSTAKA**

Landasan Teori

Uraian teori-teori yang relevan sebagai dasar penelitian.

Penelitian Terdahulu

Analisis kritis terhadap penelitian-penelitian sebelumnya yang berkaitan.

Kerangka Pemikiran

Pengembangan model teoretis yang menjadi acuan dalam penelitian.

### **3. BAB III: METODOLOGI PENELITIAN**

Desain Penelitian: Penjelasan mengenai pendekatan penelitian yang digunakan.

Populasi dan Sampel: Detail mengenai sumber data, cara pengambilan sampel, dan kriteria inklusi serta eksklusi.

Teknik Pengumpulan Data: Deskripsi metode yang digunakan untuk mengumpulkan data.

Teknik Analisis Data: Pembahasan mengenai metode analisis data yang akan diimplementasikan.

#### 4. BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Data: Penyajian dan interpretasi data yang telah dikumpulkan.

Pembahasan: Perbandingan antara hasil analisis dengan teori atau penelitian terdahulu.

#### 5. BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan: Ringkasan temuan penelitian dan jawaban atas rumusan masalah.

Saran: Rekomendasi berdasarkan hasil penelitian untuk praktik selanjutnya atau penelitian berikutnya.

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

Tinjauan pustaka dalam penelitian memegang peranan krusial sebagai fondasi teoritis yang mendukung pemahaman menyeluruh terhadap konteks penelitian. Ini memberikan perspektif luas mengenai penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi gap dalam literatur yang ada, serta membantu dalam merumuskan kerangka teoritis dan metodologi penelitian. Struktur tinjauan pustaka biasanya diorganisir secara sistematis, mulai dari pengertian umum, teori-teori kunci, penelitian terdahulu yang relevan, hingga sintesis literatur yang membentuk dasar argumentasi penelitian. Ini tidak hanya memperkuat basis teoritis penelitian, tetapi juga menunjukkan relevansi dan kontribusi penelitian terhadap bidang ilmu pengetahuan.

#### **A. Landasan Teori**

##### **1. Pengertian Baja dan Jenis-jenis Baja**

Baja adalah suatu material konstruksi yang di gunakan sangat luas, dalam berbagai jenis aplikasi industri di seluruh dunia, mulai dari industri alat berat, transportasi, gedung dan masih banyak lagi. Ketersediaan baja yang luas, karakteristik yang baik, dan fleksibilitas dalam penggunaannya membuat baja menjadi bahan yang sangat penting dalam pembangunan dan industri modern untuk saat ini.

Material baja ini terbuat dari paduan logam besi (Fe) dan karbon (C), dengan penambahan unsur-unsur seperti nikel (Ni), krom (Cr), mangan (Mn), vanadium (V), Silikon (Si) dan lainnya untuk memberikan sifat-

sifat kusus pada baja. Dengan karakteristik yang dimiliki, membuat baja dikenal karena kekuatan dan ketahanan terhadap berbagai kondisi dan menjadikannya salah satu material yang serbaguna dan vital.

Peran baja dalam industri modern tidak terbatas pada konstruksi dan infrastruktur, tetapi juga meluas keberbagai industri termasuk transportasi, otomotif, dan manufaktur.

Jenis-jenis baja yang paling umum kita jumpai dan digunakan di sekitar kita adalah :

a. Carbon Steel (Baja Karbon)

Merupakan jenis baja yang mengandung unsur karbon sebagai unsur utamadalam komposisinya, carbon steel ini di kategorikan menjadi tiga tipe berdasarkan kandungan karbon di dalamnya, yaitu :

Low Carbon Steel (Baja Karbon Rendah)

Baja dengan kandungan karbon di bawah 0,3% sangat lentur dan mudah di bentuk, sehingga sangat cocok untuk peralatan yang memerlukan proses pembentukan.

Medium Carbon Steel (Baja Karbon Menengah)

Baja ini mempunyai kandungan karbon sekitar 0,3% sampai dengan 0,6% sehingga kekuatannya lebih tinggi dibandingkan Low carbon, sehingga cocok untuk membuar roda gigi, poros dan komponen mesin yang memerlukan kekuatan dan keuletan.

High Carbon Steel (Baja karbon tinggi)

Memiliki kandungan karbon paling tinggi 0,6 % walaupun sangat kuat tetapi tingkat keuletannya rendah, sehingga sering di gunakan pada

aplikasi yang memerlukan kekuatan tinggi seperti pisau, paku ataupun perkakas tangan.

b. Alloy Steel (Baja Paduan)

Merupakan baja yang mengandung unsur-unsur paduan seperti nikel, krom, molibdenom, vanadium, dan lainnya sebagai tambahan pada unsur karbon dan besi. Hal ini tentunya akan menambah sifat-sifat khusus pada baja, seperti tahan korosi, kekuatan lebih tinggi, dan ketahanan terhadap suhu tinggi, sehingga banyak digunakan pada pembuatan alat berat, industri otomotif dan kedirgantaraan.

c. Stainless Steel (Baja Tahan Karat)

Adalah baja yang mengandung minimal 10,5% krom dalam komposisinya, yang akan membentuk lapisan oksida pelindung di permukaannya. Hal ini membuat stainless steel sangat tahan terhadap korosi dan oksidasi. Ada beberapa jenis stainless steel seperti *Austenitik* (dikenal sebagai seri 300, dengan komposisi material 18% kromium, 8% nikel, mangan, nitrogen dan besi), *Feritik* (mempunyai komposisi 10,5% karbon, 29% kromium, aluminium, molybdenum, titanium, dan jumlah nikel sedikit, baja ini tidak tahan dengan suhu panas yang tinggi), *Martensitik* (baja seri 400 kandungan karbon 0,1% hingga 2%, kromium 18%, nikel 2% serta bahan tambahan molybdenum dan nikel) dan *Duplex stainless steel* (kombinasi baja austenitik dan feritik sehingga menghasilkan material dengan tingkat kromium yang tinggi serta kandungan nikel yang rendah) hal ini

membuat baja duplex mempunyai ketahanan yang tinggi serta mudah di bentuk.

Berdasarkan komposisi plat baja yang akan di jadikan obyek penelitian dan di kombinasikan dengann material Tumbler EX 3600 maka. Plat baja HB 255, termasuk dalam baja jenis *Alloy Steel* (baja Paduan) dengan komposisi dan unsur unsur paduan seperi Nikel, krom, molybdenum, vanadium dan lain – lain. Hal ini tentunya sesuai dengan data *Chemical composition* dari *PT Tira Steel product* (Supplier PT Buma) seperti pada gambar di bawah ini.

Chemical Composition														
NO	Standar	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	N	Other
		Min												
	Max	0.20	0.80	1.70	0.02	0.01	1.50		0.70		0.50			B 0.005
1	8C11521	0.16	0.39	1.15	0.015	0.003	0.02	0.01	0.01		0.01			B 0.0019
2														
3														
4														
5														

**Gambar 2.1 Chemical Composition Plat Baja HB 255**

Sumber : Tira Austenite Tbk.

Plat baja HB 400, juga termasuk dalam baja jenis *Alloy Steel* (baja Paduan) dengan komposisi dan unsur unsur paduan seperi Nikel,krom,molybdenum,vanadium dan lain – lain.Hal ini tentunya sesuai dengan data *Chemical composition* dari *PT Tira Steel product* seperti pada gambar di bawah ini.

Chemical Composition															
NO	Standar	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	N	Other	
	Min Max	0.25 0.16	0.70 0.37	1.70 1.14	0.025 0.013	0.015 0.002	1.50 0.02	0.70 0.01	0.50 0.01						B 0.005
1	27531718														
2															
3															
4															
5															

**Gambar 2.2 Chemical Composition Plat Baja HB 400**

Sumber : PT Tira Austenite Tbk.

Plat baja ASTM A36/HB 111, termasuk dalam baja jenis *Mild steel* (baja karbon rendah) dengan komposisi dan unsur unsur Paduan krom di bawah 0,3 dan unsur unsur paduan lainnya seperti nikel, krom, molybdenum, vanadium dan lain – lain sangat sedikit. Hal ini tentunya sesuai dengan data *Chemical composition* dari *PT Tira Steel product* seperti pada gambar di bawah ini.

CHEMICAL LADLE ANALYSIS (%)														TENSILE TEST (TRC)			BENDING TEST	IMPACT VALUE (DOULE) (°C)		
C	Si	Mn	P	S	Nb	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Al	Ti	N	B	CE	YS N/mm <sup>2</sup>	TS N/mm <sup>2</sup>	EL [%] on 200 mm	180° 1.5 X T	T > 10 mm: 10 X 10 T > 7.5 < 10 mm: 7.5 X 10 T > 5 < 7.5 mm: 5 X 10 1 # II AVG
0.18	0.176	0.64	0.012	0.0052	0.002	0.14	0.10	0.06	0.016	0.005	0.029	0.002	0.0070	0.0003	0.33	303	463	27	GOOD	
0.18	0.176	0.64	0.012	0.0052	0.002	0.14	0.10	0.06	0.016	0.005	0.029	0.002	0.0070	0.0003	0.33	303	463	27	GOOD	
0.18	0.176	0.64	0.012	0.0052	0.002	0.14	0.10	0.06	0.016	0.005	0.029	0.002	0.0070	0.0003	0.33	303	463	27	GOOD	
0.18	0.176	0.64	0.012	0.0052	0.002	0.14	0.10	0.06	0.016	0.005	0.029	0.002	0.0070	0.0003	0.33	303	463	27	GOOD	
0.18	0.176	0.64	0.012	0.0052	0.002	0.14	0.10	0.06	0.016	0.005	0.029	0.002	0.0070	0.0003	0.33	303	463	27	GOOD	

**Gambar 2.3 Chemical Composition Plat Baja ASTM A36/HB 111**

Sumber : PT Gunung Raja Paksi Tbk.

Selain dari unsur unsur kimia kita juga bisa melihat kategori baja dari besarnya kekuatan Tarik dari suatu material yang tentunya akan inline dengan kekerasannya sesuai dengan tabel baja, dan kita juga bisa mengkonversi suatu baja ,masuk dalam kelas yang mana misalkan disetarakan dengan jenis baja ST.

No	Material	HB	Tensile Strength (MPA)	ST (Identik)	Merek	Jenis Baja
1	ASTM A36	111	400	37	SS400	Carbon Steel
2	HB 225	225	870	42	Hardox 225	Alloy Steel
3	HB 400	400	1390	70	Hardox 400	Alloy Steel

**Tabel 2.1** Konversi dan Jenis Baja  
Sumber :bajameter.com (Tabel Konversi baja)

Sebagaimana tabel konversi diatas baja yang akan di jadikan Obyek penelitian (Variasi Plate),jika kita konversikan segaagai contoh ASTM A36 memiliki Tingkat kekerasan HB 111,dengan tensile Strength sebesar 400 MPA,jika di setarakan dengan baja ST maka masuk atau setara dengan baja ST 37,merek di pasaran sering disebut SS 400,Demikian juga baja HB 225,memiliki tensile strength sebesar 870 MPA,jika disetarakan dengan baja ST maka masuk atau setara dengan baja ST 47 dengan jenis baja Alloy Steel,merek yang mendekati Hardox 225.dan Baja HB 400,memiliki tensile strength 1390 MPA,jika di setarakan dengan baja ST maka masuk atau setara dengan baja ST 70 dengan jenis baja Alloy steel,dipasaran merk yang mendekati Hardox 400.

## 2. Pengertian pengelasan dan klasifikasi metode pengelasan.

Pengelasan, sebagai proses penyambungan yang dominan dalam berbagai industri, melibatkan teknik yang kompleks untuk menyatukan dua atau lebih komponen logam menjadi satu kesatuan melalui aplikasi panas tinggi (Li et al., 2020). Proses ini memungkinkan bagian-bagian logam meleleh bersama, kemudian mendingin dan menyatu karena fusi.

Namun, kesederhanaan konseptual pengelasan menutupi kompleksitas pelaksanaannya. Berbagai tantangan seperti kekasaran permukaan, impuritas, ketidaksempurnaan fitting, dan diversitas sifat material yang disambung, semakin mempersulit proses penyambungan ini. Pengelasan tidak hanya terbatas pada logam yang serupa tetapi juga meliputi pengelasan heterogen, dimana logam yang berbeda dapat disatukan. Ikatan yang terbentuk melalui pengelasan bersifat metalurgi, yang berarti melibatkan difusi antar material, berbeda dengan metode penyambungan mekanis seperti penggunaan rivet atau baut.

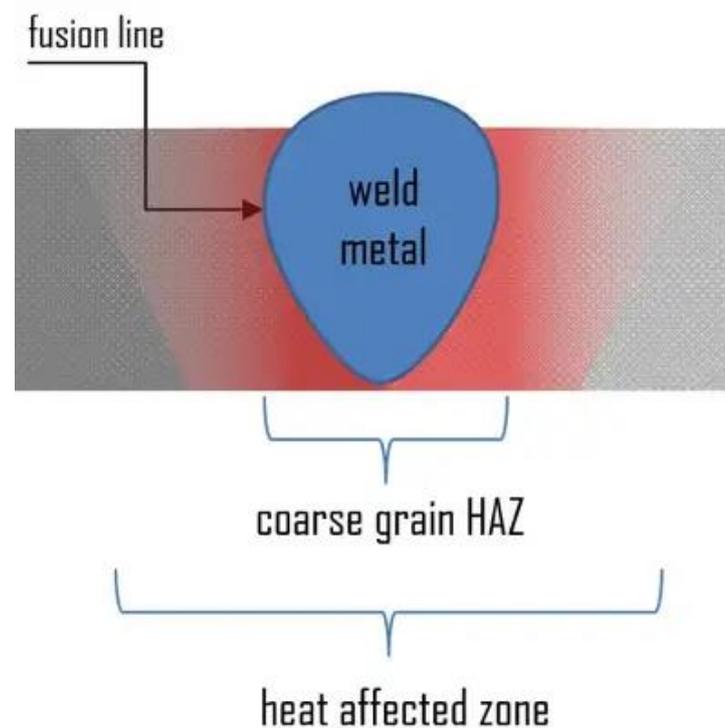
Pengelasan, sebagaimana kita kenali saat ini, merupakan evolusi dari teknik yang telah ada sejak zaman kuno (Soltan & Omar, 2022). Awalnya, satu-satunya metode yang dikenal adalah pengelasan tempa, di mana pandai besi menyatukan besi dan baja melalui pemanasan dan pemukulan. Sejak itu, teknologi pengelasan telah berkembang pesat, memperkenalkan metode-metode baru seperti pengelasan busur dan gas, yang menawarkan efisiensi dan kekuatan sambungan yang lebih besar. Metode-metode ini, bersama dengan penyolderan dan brazing, menandai kemajuan signifikan dalam teknik pengelasan, meskipun tidak semua teknik ini melibatkan prinsip fusi yang sama dengan pengelasan tradisional. Keberagaman ini mencerminkan adaptasi teknologi pengelasan terhadap kebutuhan spesifik aplikasi dan material, serta upaya berkelanjutan dalam penelitian dan pengembangan untuk mengatasi tantangan yang muncul dalam praktik pengelasan modern.

Dalam kajian fisika pengelasan, tujuan proses penyambungan adalah untuk menyatukan berbagai potongan material menjadi satu kesatuan utuh. Khususnya untuk dua potongan logam, penyatuan terjadi ketika atom di tepi satu potongan cukup dekat dengan atom di tepi potongan lain sehingga tarikan antaratom berkembang, menyebabkan dua potongan tersebut menjadi satu. Terdapat dua kategori utama dalam pengelasan yaitu sebagai berikut ini (Yoo et al., 2004).

Pertama, pengelasan fusi adalah proses teknis yang kompleks dan rinci, yang melibatkan penyatuan dua tepi atau permukaan logam dengan memanaskan hingga titik leleh. Proses ini seringkali membutuhkan penambahan logam pengisi cair untuk mengisi celah sambungan, memastikan kekuatan dan durabilitas sambungan yang optimal. Selama proses pengelasan, zona yang terpengaruh oleh panas (HAZ) terbentuk akibat transisi fase pada suhu tinggi. Zona ini merupakan area di mana sifat material dapat berubah karena paparan panas, mempengaruhi karakteristik mekanis dan struktural material tersebut (Yoo et al., 2004).

Pengelasan fusi menciptakan sambungan melalui koalesensi, yaitu proses peleburan bersama logam dasar cair dan logam pengisi cair. Koalesensi ini menghasilkan ikatan metalurgi yang kuat antara logam-logam yang disatukan. Panas yang diperlukan untuk proses peleburan ini bisa dihasilkan langsung di sendi pengelasan atau diterapkan dari sumber eksternal. Berbagai sumber panas eksternal, seperti sinar elektron, sinar laser, reaksi kimia eksotermis, dan busur listrik, digunakan tergantung pada jenis material dan aplikasi spesifik pengelasan (Lin & Chang, 2019).

Pengelasan fusi digunakan dalam pembuatan berbagai produk sehari-hari, mulai dari pesawat terbang, mobil, hingga struktur bangunan. Proses ini memainkan peran penting dalam industri manufaktur karena kemampuannya untuk menciptakan sambungan yang kuat dan tahan lama. Pengembangan teknologi pengelasan dan pemahaman yang lebih dalam tentang fisika proses pengelasan telah memungkinkan peningkatan efisiensi dan kualitas dalam pengelasan fusi, memenuhi kebutuhan industri modern yang semakin kompleks dan menuntut (Yuan et al., 2016).



**Gambar 2.4 Pengelasan Fusi**  
Sumber : Weber & Göklü, 2006

Gambar 2.4 menunjukkan struktur penyambungan logam melalui proses pengelasan, dengan fokus pada wilayah yang terpengaruh oleh panas (HAZ). Di pusat, dapat dilihat *weld metal*, yaitu logam yang telah

dilelehkan dan dibentuk kembali untuk menciptakan sambungan. Sekitar ini adalah *fusion line*, yang menandai batas antara logam asli dan logam pengelasan. Di luar garis ini, terdapat area *coarse grain HAZ'* dimana struktur butir material telah mengalami perubahan akibat pemaparan pada suhu tinggi, yang dapat mempengaruhi sifat mekanis dan metalurgis material tersebut. Area HAZ secara keseluruhan mewakili zona di mana material mengalami perubahan sifat akibat panas yang diaplikasikan selama pengelasan, yang bisa mencakup perubahan dalam kekerasan, kekuatan, dan keuletan (Yuan et al., 2016).

Selanjutnya, pengelasan fase padat merupakan teknik penyambungan yang inovatif, di mana dua permukaan logam padat bersih dibawa bersentuhan sangat dekat sehingga ikatan metalik terbentuk antara mereka. Proses ini unik karena dapat berlangsung pada suhu serendah suhu ruangan, membedakannya secara signifikan dari metode pengelasan tradisional yang umumnya memerlukan panas tinggi. Ikatan dalam pengelasan fase padat tercipta melalui dua mekanisme utama: deformasi dan difusi. Deformasi memungkinkan permukaan logam untuk beradaptasi dan menyatu, sementara difusi memfasilitasi perpindahan atom antar dua permukaan, menghasilkan ikatan yang kuat dan homogen. Teknik ini, termasuk pengelasan ultrasonik dan pengelasan ledakan, menawarkan keuntungan dalam hal efisiensi energi dan integritas material, karena minimnya panas yang diperlukan meminimalkan distorsi dan degradasi material. Pengelasan fase padat telah menemukan aplikasi luas dalam industri modern, mulai dari elektronik hingga pembuatan pesawat, berkat

kemampuannya untuk menyatukan beragam jenis material dengan keandalan dan kekuatan sambungan yang tinggi (Yuan et al., 2016).

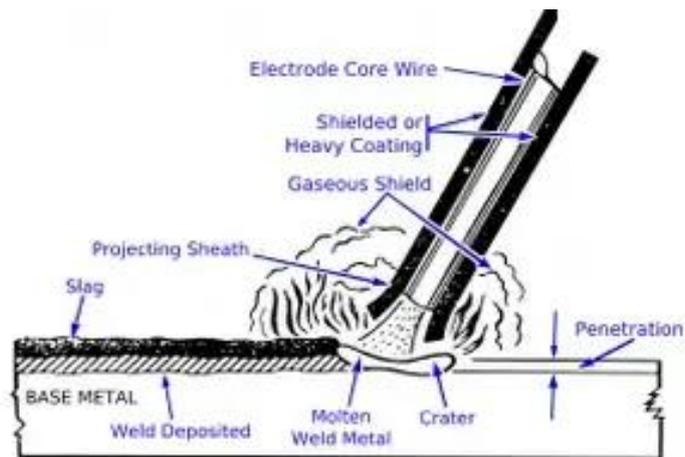
### 3. Jenis Proses Pengelasan

Memahami transfer panas dalam pengelasan adalah kunci untuk menghasilkan sambungan yang berkualitas karena proses ini dikendalikan oleh geometri, komposisi, dan struktur mikro dari material yang dilas. Pengelasan tidak hanya mengubah komposisi material pada titik sambungan tetapi juga mengubah struktur material sekitarnya. Dengan demikian, mengontrol geometri las, yang mencakup ketebalan material, sudut, dan jarak antar sambungan, adalah esensial untuk menghasilkan hasil yang diinginkan (Nishibata et al., 2009).

Pengelasan busur merupakan proses di mana busur listrik menciptakan panas yang cukup untuk melelehkan logam di titik pengelasan. Panas yang dihasilkan oleh busur listrik sangat intens, biasanya mencapai sekitar  $3590^{\circ}\text{C}$  di pusatnya, yang dengan cepat melelehkan bagian dari logam dasar. Dalam kebanyakan proses pengelasan, logam pengisi ditambahkan untuk meningkatkan volume dan kekuatan sambungan pengelasan. Dalam proses ini, kolam logam cair yang terbentuk dari logam dasar dan logam pengisi berada di dekat ujung elektroda. Saat elektroda bergerak sepanjang sambungan, logam cair tersebut membeku di belakangnya, meninggalkan sambungan las yang solid. Setiap langkah dalam proses ini harus diatur dengan presisi untuk memastikan bahwa sambungan las tidak hanya kuat tetapi juga bebas dari cacat yang dapat mempengaruhi integritas struktural. Sumber daya

pengelasan yang digunakan dapat beroperasi dengan arus langsung (DC) atau arus bolak-balik (AC). Elektroda yang digunakan bisa bersifat konsumabel, yang meleleh untuk menjadi bagian dari sambungan las, atau non-konsumabel, yang tidak meleleh dan hanya digunakan untuk menciptakan busur. Daerah pengelasan biasanya dilindungi oleh gas pelindung untuk mencegah kontaminasi yang bisa melemahkan sambungan las. Dalam pengelasan busur, panjang busur yang terbentuk berkaitan langsung dengan tegangan yang diterapkan, sedangkan jumlah input panas berkaitan dengan kuat arus. Oleh karena itu, pengaturan yang tepat dari kedua parameter ini penting untuk memastikan kualitas las yang optimal. Tegangan yang terlalu tinggi bisa menyebabkan terlalu banyak panas yang diinputkan, yang dapat merusak material atau menyebabkan terjadinya cacat pengelasan. Sebagai contoh, tegangan yang disediakan oleh perusahaan untuk tujuan industri - seperti 120 volt (V), 230 V, 380 V, atau 480 V - adalah terlalu tinggi untuk digunakan langsung dalam pengelasan busur. Oleh karena itu, sumber daya pengelasan busur pertama-tama harus menurunkan tegangan tinggi ini ke kisaran yang lebih sesuai, biasanya antara 20 V hingga 80 V. Sumber daya yang memberikan arus konstan biasanya lebih disukai untuk proses pengelasan manual, seperti pengelasan gas tungsten dan pengelasan busur metal terlindung. Sumber daya ini dapat menjaga arus yang relatif konstan bahkan ketika terjadi variasi pada tegangan, yang sangat penting dalam pengelasan manual di mana stabilitas elektroda sulit untuk dipertahankan secara konsisten. Fluktuasi panjang busur dan tegangan merupakan tantangan

dalam pengelasan manual, karena ini dapat mempengaruhi stabilitas panas yang dihasilkan. Namun, pengelas yang terampil dapat mengatur arus dan tegangan untuk mengakomodasi perubahan ini, memastikan bahwa sambungan las yang dihasilkan tetap berkualitas tinggi dan bebas dari cacat (Nishibata et al., 2009).



**Gambar 2. 5 Shielded metal arc welding (SMAW)**  
Sumber : Dwijo Suwito, Sejarah Pengelasan, 2015

Pengelasan busur logam terlindung (*Shielded Metal Arc Welding* – SMAW), yang juga dikenal sebagai pengelasan busur manual (*Manual Metal Arc Welding* – MMAW) atau pengelasan tongkat, adalah salah satu jenis pengelasan busur yang paling umum dan banyak dipelajari. SMAW menggunakan elektroda yang terdiri dari batang logam pengisi yang dilapisi oleh fluks. Fluks ini memiliki fungsi ganda; selain memberikan perlindungan terhadap oksidasi dan kontaminasi di area pengelasan, ia juga menghasilkan gas karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) selama proses pengelasan untuk melindungi sambungan las dari atmosfer. Logam pengisi yang digunakan dalam batang elektroda harus kompatibel dengan logam dasar

yang akan dilas, biasanya memiliki komposisi yang mendekati logam dasar tersebut. Arus listrik digunakan untuk menimbulkan busur antara material dasar dan elektroda yang habis terpakai selama proses pengelasan, yang mana menghasilkan panas yang cukup untuk melelehkan kedua logam tersebut dan membentuk sambungan las. Proses SMAW ini merupakan proses yang sederhana dalam hal kebutuhan peralatan. Proses ini serbaguna dan dapat dilakukan dengan peralatan yang relatif tidak mahal, membuatnya cocok untuk pekerjaan di bengkel dan di lapangan. Seorang operator dapat menjadi cukup mahir dengan pelatihan yang moderat dan dapat mencapai penguasaan dengan pengalaman. Kebanyakan pengelas baru memulai sebagai “pengelas tongkat” dan mengembangkan keterampilan yang diperlukan melalui pelatihan dan pengalaman. Waktu pengelasan dalam proses SMAW cenderung lambat karena elektroda yang habis terpakai harus sering diganti dan karena slag, residu dari fluks, harus dipukul untuk dihilangkan setelah pengelasan. Namun, keterbatasan ini sebanding dengan keflexibilitasnya yang tinggi dan kemampuan untuk menghasilkan las yang kuat bahkan dalam kondisi yang tidak ideal. Dalam konteks industri, SMAW sangat dihargai karena kemampuannya untuk menyambung berbagai jenis logam dan aplikasi yang berbeda. Pengelasan SMAW sangat berguna dalam kondisi di mana peralatan pengelasan lainnya tidak praktis untuk digunakan, seperti dalam perbaikan atau konstruksi di lokasi terpencil. Kesimpulannya, SMAW adalah metode pengelasan yang penting dalam bidang fabrikasi dan konstruksi, yang terus relevan meskipun ada kemajuan dalam teknologi

pengelasan lainnya. Keandalan, kemudahan penggunaan, dan adaptabilitasnya menjadikan SMAW sebagai pilihan yang berharga bagi pengelas di seluruh dunia (Reisgen et al., 2020).

Pengelasan busur logam dengan gas (*Gas Metal Arc Welding - GMAW*), yang lebih dikenal sebagai pengelasan gas inert metal atau MIG welding, adalah sebuah proses pengelasan busur di mana elektroda yang digunakan merupakan kawat telanjang yang dapat habis terpakai dan perlindungan terhadap hasil las dicapai dengan membanjiri busur las dengan gas inert. GMAW membedakan diri dari proses SMAW karena menggunakan elektroda yang merupakan kawat padat telanjang yang secara kontinu disuplai ke area las dan menjadi logam pengisi seiring dengan konsumsinya. Berbeda dengan elektroda SMAW yang harus dibuang saat mencapai panjang minimum tertentu (Rajaprakash et al., 2014).

*Gas Metal Arc Welding* banyak digunakan dalam mode semi-otomatis, mesin, dan otomatisasi. Perlindungan gas harus memberikan proteksi penuh karena bahkan sejumlah kecil udara yang terjebak bisa mengkontaminasi deposit las. Awalnya, hanya gas inert seperti argon dan helium yang digunakan untuk perisai. Saat ini, karbon dioksida juga digunakan dan dapat dicampur dengan gas inert. Karena GMAW secara terus menerus menyuplai kawat, elektroda tidak perlu diganti secara berkala seperti dalam kasus SMAW, membuat proses ini cocok untuk pengelasan otomatis. Proses terkait, pengelasan busur dengan kawat inti (*Flux-Cored Arc Welding - FCAW*), menggunakan peralatan yang serupa

tetapi mengandalkan kawat yang terdiri dari elektroda baja yang mengelilingi bahan pengisi serbuk. Kawat inti ini lebih mahal daripada kawat padat standar dan dapat menghasilkan asap dan/atau slag, tetapi memungkinkan kecepatan pengelasan yang bahkan lebih tinggi dan penetrasi logam yang lebih dalam (Piolle, 2021).

Selanjutnya, pengelasan busur gas tungsten, yang lebih dikenal dengan sebutan TIG welding (*Tungsten Inert Gas Welding*), merupakan proses pengelasan busur yang menggunakan elektroda tungsten yang tidak habis terpakai dan gas inert sebagai perisai busur. Proses GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) dapat dijalankan dengan atau tanpa menggunakan logam pengisi. Apabila logam pengisi digunakan, maka ia ditambahkan ke kolam las dari batang atau kawat terpisah. Gas perisai yang biasa digunakan adalah argon, helium, atau campuran kedua gas tersebut. Pengelasan TIG sangat berguna untuk mengelas material yang tipis dan metode ini ditandai dengan busur yang stabil serta hasil las yang berkualitas tinggi, tetapi membutuhkan keterampilan operator yang signifikan dan hanya dapat dilakukan pada kecepatan yang relatif rendah. Karena proses GTAW merupakan proses pengelasan yang sangat bersih, metode ini dapat digunakan untuk mengelas logam reaktif, seperti titanium dan zirkonium, serta aluminium dan magnesium (Piolle, 2021).

Keunggulan dari pengelasan TIG terletak pada kontrol yang dapat diatur dengan presisi tinggi atas variabel pengelasan, yang menghasilkan las dengan estetika yang lebih baik dan minim cacat. Tidak adanya slag yang perlu dibersihkan dan kemampuan untuk bekerja tanpa logam

pengisi, bila diperlukan, memberikan keuntungan dalam aplikasi tertentu. Karena elektroda tungsten tidak habis terpakai selama proses pengelasan, hal ini menghilangkan kebutuhan untuk mengganti elektroda secara berkala, yang merupakan salah satu keterbatasan dari proses pengelasan SMAW. Dalam praktiknya, pengelasan TIG memerlukan operator yang sangat terampil dan terlatih untuk mempertahankan kontrol atas panas dan kolam las, terutama ketika mengelas logam yang tipis atau melakukan pengelasan pada posisi yang sulit. Keterampilan ini penting karena adanya risiko yang lebih besar terhadap cacat seperti terjadinya penetrasi yang berlebihan atau kurang, terutama pada material yang lebih tipis (Costa Assunção et al., 2017).

Pengelasan TIG juga memiliki aplikasi yang luas dalam industri karena kemampuannya untuk menghasilkan sambungan las yang kuat dan tahan terhadap korosi, terutama pada material yang tidak dapat dielas dengan baik menggunakan metode pengelasan lainnya. Pengelasan TIG sering digunakan dalam pembuatan peralatan makan, interior kapal terbang, dan berbagai komponen dalam industri otomotif yang membutuhkan penampilan yang bersih dan rapi. Meski memiliki banyak kelebihan, pengelasan TIG bukan tanpa tantangan. Prosesnya yang lebih lambat dibandingkan dengan pengelasan MIG atau SMAW berarti waktu produksi yang lebih lama dan biaya yang lebih tinggi, terutama pada volume produksi yang besar. Selain itu, kebutuhan akan gas perisai dan peralatan tambahan bisa menambah kompleksitas dan biaya operasional. Kemajuan dalam teknologi pengelasan telah memungkinkan

pengembangan peralatan TIG yang lebih canggih, termasuk sistem yang dapat mengontrol dengan tepat input panas dan durasi pulsa, yang sangat meningkatkan kualitas dan efisiensi pengelasan TIG. Dengan adanya sistem kontrol digital, pengelasan TIG kini dapat diotomatisasi untuk aplikasi yang memerlukan presisi tinggi dan kualitas las yang konsisten. Akhirnya, pengelasan TIG merupakan metode pengelasan yang sangat dihargai dalam aplikasi yang memerlukan tingkat kehalusan dan kekuatan las yang tinggi. Ini adalah alasan utama mengapa TIG tetap menjadi metode yang berharga dan sering digunakan oleh pengelas profesional di seluruh dunia, terlepas dari tingkat keahlian yang dibutuhkan untuk menguasainya (García et al., 2002).



**Gambar 2.6 Submerged Arc Welding**  
Sumber : <http://instagram.com/xazazelx13>

*Submerged Arc Welding (SAW)* merupakan metode pengelasan yang menghasilkan kualitas tinggi, yang melibatkan penenggelaman busur

pengelasan di bawah gundukan partikel fluks granular. Partikel ini terdiri dari kapur, silika, oksida mangan, dan fluorida kalsium. Saat busur pengelasan diinisiasi, fluks tambahan terus ditambahkan di depan elektroda seiring dengan kemajuan perjalanan las. Fluks ini melindungi busur dan logam las cair dari atmosfer sekitar, sehingga mencegah pembentukan oksida. Logam pengisi utamanya diperoleh dari kawat elektroda yang terus menerus disuplai melalui selimut fluks ke dalam busur dan kolam fluks cair. Hal ini meningkatkan kualitas busur karena kontaminan di atmosfer diblokir oleh fluks. Fluks yang meleleh menjadi slag, yang merupakan material limbah dan harus dihilangkan setelah pengelasan. Selama proses pengelasan busur terendam, tidak semua fluks berubah menjadi slag. Tergantung pada proses pengelasannya, 50% hingga 90% dari fluks dapat digunakan Kembali (Liu et al., 2021).

Metode SAW menyediakan sejumlah keuntungan signifikan dibandingkan dengan teknik pengelasan lainnya, terutama dalam hal perlindungan yang diberikan oleh fluks. Keberadaan fluks tidak hanya melindungi kolam las dari kontaminasi, tetapi juga stabilisasi busur pengelasan, yang menghasilkan las yang lebih bersih dan berkualitas tinggi. Penggunaan fluks granular memungkinkan proses pengelasan untuk dilakukan tanpa terpengaruh oleh faktor eksternal seperti angin, yang sering kali menjadi masalah dalam pengelasan luar ruangan (Kondrat'ev et al., 2023).

SAW juga dikenal karena efisiensinya dalam penggunaan material. Karena elektroda kawat yang terus menerus disuplai, proses ini sangat

cocok untuk pengelasan otomatis dan semi-otomatis, memungkinkan produksi yang cepat dan efisien. Selain itu, kemampuan untuk menggunakan kembali fluks mengurangi biaya material dan limbah, membuat SAW menjadi pilihan yang ekonomis untuk proyek-proyek skala besar (Aloraier et al., 2012).

Meskipun SAW memiliki banyak kelebihan, terdapat juga beberapa keterbatasan. Proses ini umumnya terbatas pada pengelasan posisi datar atau horizontal karena potensi fluks yang tumpah, yang membatasi fleksibilitasnya dibandingkan dengan metode pengelasan lain. Selain itu, penghilangan slag setelah pengelasan memerlukan waktu dan usaha tambahan, yang bisa menjadi pertimbangan dalam lingkungan produksi yang cepat (Kazemi & Ahmadi, 2024).

Penggunaan SAW dalam industri telah terbukti sangat berharga, terutama dalam konstruksi kapal, pembuatan pipa, dan konstruksi baja berat, di mana kualitas dan kekuatan sambungan las adalah kritis. Dengan perkembangan teknologi pengelasan dan peralatan, SAW terus berkembang untuk memenuhi kebutuhan aplikasi yang lebih spesifik, menawarkan solusi pengelasan yang efisien dan berkualitas tinggi untuk tantangan manufaktur modern (Yang et al., 2019). Kesimpulannya, pengelasan busur terendam adalah teknologi pengelasan yang penting, yang menawarkan keunggulan dalam kualitas, kecepatan, dan efisiensi. Meskipun memerlukan peralatan khusus dan penanganan material yang cermat, kelebihan yang ditawarkan oleh SAW menjadikannya teknik yang berharga dalam berbagai aplikasi industri.

Selanjutnya adalah *resistance welding*. Pengelasan resistansi (*Resistance Welding* - ERW) merupakan proses pengelasan yang menghasilkan panas dari arus listrik yang mengalir melalui bagian yang disatukan. Dalam proses ini, kolam logam cair terbentuk di area las karena arus tinggi (1000–100,000 A) dilewatkan melalui logam. Pengelasan resistansi banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri, seperti dalam pembuatan pipa baja dan perakitan bodi mobil. Industri pembuatan kendaraan, di antara lainnya, secara ekstensif memanfaatkan proses resistansi ini dalam aplikasi di mana desain produk menentukan ketebalan gauge yang tumpang tindih. Sistem otomatis penuh dan robotik digunakan untuk banyak aplikasi ini (Phaoniam et al., 2013).

Kekhususan pengelasan resistansi terletak pada efisiensinya dalam menghasilkan panas melalui resistansi listrik bahan itu sendiri, yang secara langsung mengubah energi listrik menjadi panas tanpa perlu sumber panas eksternal. Ini berarti bahwa efisiensi energi dalam pengelasan resistansi sangat tinggi, menjadikannya pilihan yang ekonomis untuk produksi massal, terutama dalam industri otomotif di mana pengulangan dan konsistensi adalah kunci (Kessler et al., 2021).

Selain itu, pengelasan resistansi menawarkan keunggulan dalam hal kecepatan pengelasan dan kemampuan untuk mengelas bahan dengan ketebalan yang berbeda, yang sangat bermanfaat dalam pembuatan komponen otomotif. Dengan kemampuannya untuk menghasilkan sambungan las yang kuat dan tahan lama dalam waktu yang singkat, proses ini menjadi sangat berharga dalam lini produksi yang menuntut efisiensi

tinggi. Pengelasan resistansi tidak hanya terbatas pada aplikasi otomotif; berbagai industri lain seperti pembuatan peralatan rumah tangga dan elektronik juga memanfaatkan teknik ini untuk menyatukan komponen logam dengan cepat dan efisien. Kekuatan sambungan las yang dihasilkan, dikombinasikan dengan kecepatan dan efisiensi proses, membuat pengelasan resistansi menjadi teknik yang sangat diandalkan dalam pembuatan produk (Kodama et al., 2004).

Namun, meskipun pengelasan resistansi menawarkan banyak keuntungan, teknik ini juga memiliki keterbatasan. Misalnya, hanya material yang memiliki konduktivitas listrik dan resistansi panas yang cocok yang dapat dilas menggunakan metode ini. Ini berarti bahwa pilihan material terkadang terbatas, yang dapat mempengaruhi desain produk. Perkembangan terkini dalam teknologi pengelasan resistansi termasuk pengenalan kontrol proses yang lebih canggih, yang memungkinkan penyesuaian yang lebih baik terhadap parameter pengelasan untuk mengoptimalkan kualitas las. Inovasi ini, bersama dengan integrasi sistem robotik, telah membuka kemungkinan baru dalam otomatisasi proses pengelasan resistansi, meningkatkan produktivitas dan konsistensi las. Pengelasan resistansi tetap menjadi teknologi kunci dalam banyak aplikasi industri, berkat efisiensi, kecepatan, dan fleksibilitasnya. Dengan terus berkembangnya inovasi dalam teknologi pengelasan resistansi, proses ini diperkirakan akan terus memainkan peran penting dalam manufaktur untuk tahun-tahun mendatang, memenuhi kebutuhan

industri yang terus berkembang dan semakin kompleks (Ackerman et al., 2018).

Kemudian, pengelasan titik resistansi, atau pengelasan titik, merupakan proses pengelasan yang digunakan untuk menyatukan dua atau lebih lembaran logam yang bertumpuk, paku keling, tonjolan, atau permukaan lain yang pas dan berdekatan di satu atau lebih titik. Metode ini menghasilkan sambungan melalui panas yang dihasilkan dari resistansi benda kerja terhadap aliran arus dan aplikasi tekanan. Las terbatas pada titik-titik pada benda kerja yang bertumpuk dan karena itu tidak berkelanjutan. Elektroda tembaga yang runcing menghantarkan arus pengelasan ke titik kerja dan juga berfungsi untuk menerapkan tekanan untuk membentuk sambungan yang kuat. Permukaan yang bersentuhan ini dipanaskan oleh pulsa arus berdurasi pendek dengan tegangan rendah dan arus tinggi untuk membentuk nugget las yang melebur. Kolam kecil dari logam cair terbentuk di area las saat arus tinggi (1000-100,000 A) dialirkan melalui logam. Ketika aliran arus dihentikan, tekanan elektroda dipertahankan sementara logam las cepat mendingin dan membeku. Elektroda terbuat dari paduan tembaga-kromium yang diperkuat presipitasi dan/atau zirkonium dan harus diganti setelah sejumlah las tertentu (Ito et al., 2021).

Keuntungan dari metode ini termasuk penggunaan energi yang efisien, deformasi benda kerja yang terbatas, tingkat produksi yang tinggi, kemudahan otomasi, dan tidak memerlukan bahan pengisi. Kerugian utamanya adalah kebutuhan untuk memiliki aksesibilitas ke kedua sisi

benda kerja, berbeda dengan kemampuan untuk membuat las dari satu sisi saja. Metode pengelasan yang paling sering digunakan untuk aplikasi otomotif termasuk pengelasan titik resistansi (RSW). Industri manufaktur kendaraan, di antara lain, menggunakan proses resistansi secara ekstensif dalam aplikasi di mana desain produk menentukan ketebalan gauge yang bertumpuk. Sistem otomatis dan robotik digunakan untuk banyak aplikasi ini. Rata-rata, bodi konvensional mobil mengandung 4500 sambungan las titik (Júnior et al., 2020).



**Gambar 2.7 Laser Beam Welding**

Sumber : <http://youtube/Solution> With Innovation, 2017

Pengelasan sinar laser (Laser Beam Welding - LBW) merupakan salah satu proses pengelasan dengan kepadatan daya tinggi (sekitar 1 MW/cm<sup>2</sup>), yang memanfaatkan tingkat input panas yang sangat tinggi. Proses ini biasanya membutuhkan otomatisasi dan memiliki potensi yang luar biasa untuk produksi berkecepatan tinggi. Pengelasan laser memanfaatkan panas yang disuplai oleh sinar laser yang mengenai sambungan untuk melakukan pengelasan fusi material. Laser adalah

perangkat yang memancarkan cahaya melalui proses amplifikasi optik berdasarkan emisi stimulasi radiasi elektromagnetik. Untuk tujuan pengelasan, sinar laser merupakan cahaya koheren, monokromatik dalam spektrum radiasi elektromagnetik frekuensi inframerah atau ultraviolet, sehingga sinarnya tidak terlihat. Laser karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) komersial dapat memancarkan ratusan watt dalam satu mode spasial yang dapat difokuskan ke titik yang sangat kecil. Emisi ini berada dalam inframerah termal pada 10,6  $\mu\text{m}$ ; laser semacam itu secara rutin digunakan dalam industri untuk pemotongan dan pengelasan. Sinar mentah yang sedikit menyimpang difokuskan ke titik kecil untuk mendapatkan kepadatan daya terbesar (Sinclair & Nehring, 2019).

Keuntungan utama dari pengelasan laser termasuk fleksibilitas yang baik, peningkatan produktivitas dengan penghematan yang substansial pada biaya perawatan dan energi sambil menghasilkan las yang kuat. Lembaran logam dengan ketebalan dalam kisaran 0,2 hingga 6mm dapat dengan mudah dilas menggunakan laser. Mayoritas industri otomotif mempekerjakan sistem laser CO<sub>2</sub> aliran silang dengan rentang daya 3 hingga 5 kW. Harus diambil tindakan pencegahan khusus untuk keselamatan pribadi. Sebuah kandang keselamatan wajib digunakan untuk perlindungan terhadap radiasi yang tersebar. Kacamata pelindung dan pakaian yang sesuai untuk jenis laser tertentu harus digunakan. Peralatan laser sangat canggih dan mahal, memerlukan personel yang berpengalaman untuk menginstal dan mengatur parameter. Oleh karena

itu, proses ini membutuhkan otomatisasi dan memiliki potensi yang sangat baik untuk produksi berkecepatan tinggi (Sinclair & Nehring, 2019).

Pengelasan laser menawarkan solusi yang sangat efektif untuk aplikasi yang memerlukan kecepatan tinggi, presisi, dan minimnya pengaruh panas pada material yang dilas. Kemampuan untuk mengontrol dengan tepat input panas dan lokasinya memungkinkan pengelasan bahan yang sangat sensitif termal tanpa merusak area di sekitar sambungan las. Selain itu, karena minimnya kontak fisik, pengelasan laser sangat berguna untuk mengelas komponen yang sulit dijangkau atau halus. Namun, biaya awal yang tinggi untuk peralatan laser dan kebutuhan untuk pelatihan operator yang khusus bisa menjadi penghalang bagi beberapa aplikasi. Selain itu, pengelasan laser memerlukan kondisi lingkungan yang terkontrol untuk mencegah gangguan dari pantulan sinar laser atau penyebaran material yang tidak diinginkan. Secara keseluruhan, pengelasan laser LBW menawarkan kemajuan teknologi yang signifikan dalam bidang pengelasan, menawarkan kemungkinan baru dalam desain dan manufaktur dengan efisiensi dan kualitas yang belum pernah terjadi sebelumnya. Dengan terus berkembangnya teknologi laser dan penurunan biaya terkait, penggunaannya diharapkan akan semakin luas di berbagai sektor industri (Sitthipong et al., 2017).



**Gambar 2.8 Pengelasan gas oksifuel**

Sumber : <http://soldadoresonline.com>

Pengelasan gas oksifuel adalah teknik pengelasan yang menggunakan panas dari nyala api gas untuk melelehkan logam pengisi, jika digunakan, dan logam dasar, sehingga menciptakan sambungan las. Pengelasan gas merupakan salah satu proses pengelasan tertua dan paling serbaguna, namun dalam beberapa tahun terakhir popularitasnya menurun dalam aplikasi industri. Meskipun demikian, pengelasan gas masih banyak digunakan untuk pengelasan pipa dan tabung, serta pekerjaan perbaikan. Proses serupa, umumnya disebut pemotongan oksifuel, digunakan untuk memotong logam (Xu & Yoon, 2016).

Proses pengelasan gas yang paling umum adalah pengelasan oksiasetilena. Peralatannya relatif murah dan sederhana, umumnya menggunakan pembakaran asetilena dalam oksigen untuk menghasilkan suhu nyala api pengelasan sekitar 3100 °C. Oksigen murni, bukan udara, digunakan untuk meningkatkan suhu nyala agar memungkinkan pelelehan

lokal material kerja. Suhu pembakarannya merupakan fungsi dari jumlah oksigen yang hadir dalam campuran gas (Dwivedi, 2022).

Gas untuk pengelasan oksifuel meliputi:

- a. Asetilena – Oksigen: Dibandingkan dengan gas bahan bakar lainnya, oksasi-asetilena dapat menghasilkan nyala api terpanas dan paling terkonsentrasi. Nyala api oksasi-asetilena juga menghasilkan karbon dioksida, yang berfungsi sebagai gas pelindung. Nyala api oksasi-asetilena membakar sekitar 3773 K (3500 °C; 6332 °F). Sebagai bahan bakar, kelemahan utama asetilena, dibandingkan dengan bahan bakar lain, adalah harganya yang tinggi.
- b. Metilasetilena-propadiena stabil (MPS) memiliki karakteristik penyimpanan dan pengiriman seperti LPG dan memiliki nilai panas sedikit lebih rendah daripada asetilena. MPS direkomendasikan untuk aplikasi pemotongan khususnya, bukan pengelasan.
- c. Hidrogen – Oksigen: Hidrogen memiliki nyala api bersih dan cocok untuk digunakan pada aluminium. Dapat digunakan pada tekanan lebih tinggi dari asetilena dan oleh karena itu berguna untuk pengelasan dan pemotongan di bawah air. Merupakan jenis nyala api yang baik saat memanaskan sejumlah besar material. Hidrogen tidak digunakan untuk pengelasan baja dan material ferrous lainnya, karena menyebabkan kerapuhan hidrogen. Nyala api oksihidrogen membakar pada 3073 K (2800 °C; 5072 °F).

Nyala api dapat berupa oksidasi, netral, atau reduksi, tergantung pada jumlah oksigen dalam campuran gas (Blednova et al., 2002).

Pengelasan umumnya dilakukan menggunakan pengaturan nyala api netral yang memiliki jumlah oksigen dan asetilena yang sama. Nyala api reduksi memiliki oksigen rendah dan kelebihan asetilena, mengubah komposisi kimia kolam las dengan mengurangi oksida besi (efek reduksi) dan menambahkan karbon (efek karburasi). Sementara itu, nyala api netral dianggap netral karena tidak secara signifikan menambah atau mengurangi unsur apa pun dari kolam las. Nyala api oksidasi, yang dihasilkan dengan jumlah oksigen berlebih, cenderung mengoksidasi permukaan logam, memiliki efek merugikan pada sifat-sifat paduan ferrous. Dengan beberapa pengecualian, nyala api oksidasi biasanya tidak diinginkan untuk pengelasan dan penyolderan.

Selanjutnya, pengelasan gesekan (*Friction Welding*) adalah metode pengelasan keadaan padat di mana panas dihasilkan dari gerakan menggesek yang diinduksi secara mekanis antara bagian-bagian yang akan dilas (Dwivedi, 2022). Dalam pengelasan keadaan padat, sambungan dihasilkan dengan penerapan tekanan tanpa melelehkan secara signifikan bagian kerja apa pun. Karena tidak terjadi pelelehan, pengelasan gesekan bukanlah proses pengelasan fusi dalam pengertian tradisional. Bagian-bagian yang dilas dijaga bersama di bawah tekanan. Secara umum, panas gesekan dihasilkan dengan memutar salah satu bagian terhadap yang lain. Ketika suhu tertentu tercapai, gerakan rotasi dihentikan dan tekanan yang diterapkan menyatukan bagian-bagian tersebut. Proses pengikatan didasarkan pada deformasi atau difusi dan deformasi terbatas, sehingga pergerakan atom (difusi) menciptakan ikatan baru antara atom dari dua

permukaan. Waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan las gesekan diukur dalam hitungan detik.

Keuntungan dari pengelasan gesekan termasuk waktu penyambungan yang cepat (dalam hitungan beberapa detik) dan input panas langsung di antarmuka las, menghasilkan zona yang terpengaruh panas relatif kecil. Jika perangkat pemuatan dan pembongkaran otomatis dipasang, mesinnya sepenuhnya otomatis. Gas pelindung, fluks, dan logam pengisi tidak perlu digunakan. Proses ini berhasil menyatukan berbagai macam material serupa serta sejumlah logam yang berbeda, termasuk aluminium dengan baja. Hal ini sangat berguna di bidang aerospace, di mana digunakan untuk menyatukan stok aluminium ringan dengan baja kekuatan tinggi. Di sisi lain, benda kerja memiliki keterbatasan dimensi. Pengelasan gesekan terutama terbatas untuk batang bulat dengan penampang serupa, meskipun potongan bentuk lain masih mungkin untuk dilas namun lebih sulit. Pengelasan gesekan biasanya menggunakan mesin rotary khusus, yang membutuhkan biaya modal yang lebih tinggi (Reisgen et al., 2019).

Pengelasan ledakan (*Explosion Welding*) melibatkan penyatuan material dengan mendorongnya bersama-sama di bawah tekanan yang sangat tinggi, yang dihasilkan dari detonasikan yang terkontrol. Energi dari dampak tersebut memplastisasi material, membentuk las, meskipun hanya menghasilkan sedikit panas. Logam dengan daktilitas tinggi yang memiliki susunan atom kubus berpusat wajah dan tidak cepat mengeras karena kerja adalah yang terbaik untuk proses ini. Ini termasuk aluminium

dan tembaga, baja tahan karat, emas, perak, dan platinum. Geometri tipikal yang dihasilkan meliputi pelat, tabung, dan lembaran tabung. Proses ini umum digunakan untuk pengelasan material yang berbeda, termasuk menyatukan aluminium dengan baja karbon pada lambung kapal dan baja tahan karat atau titanium dengan baja karbon pada bejana tekan petrokimia. Salah satu kekurangan metode ini adalah pengetahuan ekstensif tentang bahan peledak diperlukan sebelum prosedur dapat dilakukan dengan aman (Reisgen et al., 2019).

#### 4. Material Pengelasan

Material pengelasan yang pertama adalah elektroda kawat las yang merupakan komponen kunci dalam proses pengelasan yang berfungsi sebagai medium untuk menghantarkan arus listrik yang diperlukan untuk menciptakan busur pengelasan. Dalam hal ini, ada dua jenis utama elektroda kawat las, yaitu kawat las terbungkus (*covered electrodes*) dan kawat las tanpa pelindung (*bare electrodes*), yang masing-masing memiliki karakteristik dan aplikasi yang berbeda. Kawat las terbungkus adalah elektroda yang dilapisi oleh lapisan bahan kimia atau mineral tertentu. Lapisan ini, yang dikenal sebagai fluks, memiliki beberapa fungsi penting: pertama, melindungi logam cair di zona las dari kontaminasi atmosfer dengan menghasilkan gas pelindung saat terbakar; kedua, membantu dalam stabilisasi busur pengelasan; dan ketiga, meningkatkan kualitas las dengan mengontrol karakteristik metalurgi dari sambungan las. Lapisan fluks ini juga membantu dalam membersihkan logam dasar, mengurangi inklusi slag, dan bisa menambah elemen paduan ke dalam sambungan las

untuk meningkatkan sifat-sifat tertentu. Penggunaan kawat las terbungkus sangat umum dalam pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) atau pengelasan busur manual. Di sisi lain, kawat las tanpa pelindung adalah elektroda yang tidak dilapisi oleh fluks dan umumnya digunakan dalam proses pengelasan yang membutuhkan gas pelindung terpisah, seperti GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) atau MIG (*Metal Inert Gas Welding*). Dalam proses ini, gas pelindung dihantarkan secara eksternal untuk melindungi zona las dari kontaminasi atmosfer. Elektroda tanpa pelindung biasanya terbuat dari logam atau paduan yang spesifik sesuai dengan material dasar yang akan dilas, memungkinkan untuk pengelasan yang lebih bersih dengan minimnya residu slag. Penggunaan gas pelindung, seperti argon atau campuran argon dan CO<sub>2</sub>, memberikan perlindungan yang efektif terhadap oksidasi dan kontaminasi selama proses pengelasan. Kedua jenis elektroda kawat las ini memainkan peran penting dalam dunia pengelasan, dengan masing-masing memiliki kelebihan dan aplikasi spesifik tergantung pada kebutuhan pengelasan. Pemilihan jenis elektroda yang tepat sangat penting untuk mencapai hasil pengelasan yang optimal, baik dari segi kekuatan maupun estetika las (Reisgen et al., 2019).

Kemudian, kawat las flux-cored merupakan revolusi dalam teknologi pengelasan, yang menawarkan solusi unik untuk tantangan pengelasan tertentu. Dengan desain yang inovatif, kawat ini diisi dengan fluks yang tidak hanya berfungsi sebagai sumber gas pelindung untuk melindungi zona las dari kontaminasi atmosfer, tetapi juga menyediakan

elemen paduan yang diperlukan selama proses pengelasan. Penggunaan fluks ini krusial dalam menciptakan sambungan las yang lebih bersih dan lebih kuat, sekaligus mengurangi kebutuhan akan operasi pembersihan pasca-pengelasan (Sitthipong et al., 2017).

Proses pengelasan FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*) yang memanfaatkan kawat las flux-cored ini menawarkan beberapa keuntungan signifikan dibandingkan dengan metode pengelasan tradisional. Pertama, karena gas pelindung dihasilkan secara internal oleh fluks, proses ini lebih fleksibel dan dapat digunakan dalam kondisi lingkungan yang lebih bervariasi, termasuk di luar ruangan di mana penggunaan gas pelindung eksternal mungkin tidak praktis. Kedua, kawat las *flux-cored* memungkinkan penetrasi yang lebih dalam dan kecepatan pengelasan yang lebih tinggi, meningkatkan produktivitas dan efisiensi dalam pembuatan atau perbaikan struktur (Ito et al., 2021).

Selain itu, kawat las flux-cored dirancang untuk menghasilkan sambungan las dengan karakteristik mekanis yang superior, termasuk kekuatan tarik yang tinggi dan ketahanan terhadap retak. Hal ini menjadikan kawat ini pilihan yang tepat untuk aplikasi yang menuntut kekuatan las yang tinggi dan durabilitas jangka panjang, seperti dalam konstruksi infrastruktur berat, industri pembuatan kapal, dan perbaikan alat berat. Namun, penggunaan kawat las flux-cored juga memiliki tantangan. Pemilihan fluks yang tepat dan penanganan kawat memerlukan keahlian khusus untuk memastikan hasil pengelasan yang optimal. Selain itu, biaya material untuk kawat las flux-cored bisa lebih tinggi

dibandingkan dengan elektroda tradisional, meskipun efisiensi dan pengurangan waktu pembersihan dapat menyeimbangkan biaya tambahan tersebut. Dalam konteks pengelasan industri, pemahaman mendalam tentang karakteristik dan aplikasi kawat las flux-cored sangat penting. Hal ini memungkinkan praktisi pengelasan untuk memilih kawat yang paling sesuai dengan kebutuhan spesifik proyek mereka, memastikan bahwa pengelasan tidak hanya efisien dari segi waktu dan biaya, tetapi juga menghasilkan struktur yang kuat, tahan lama, dan aman (Kessler et al., 2021).

Kemudian, kawat las solid merupakan komponen esensial dalam pengelasan GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) atau yang lebih dikenal dengan MIG (*Metal Inert Gas Welding*), menyediakan cara efektif untuk menyambung logam dengan menggunakan gas pelindung. Kawat ini biasanya terbuat dari logam murni atau paduan, dirancang untuk memenuhi kebutuhan spesifik dari berbagai aplikasi pengelasan. Dalam proses GMAW, kawat las solid berfungsi sebagai elektroda dan logam pengisi secara simultan, dimana arus listrik digunakan untuk membentuk busur antara kawat dan logam dasar. Panas yang dihasilkan dari busur tersebut melelehkan kawat dan sebagian dari logam dasar, membentuk kolam las yang ketika mendingin akan membentuk sambungan yang kuat (Yoo et al., 2004).

Penggunaan gas pelindung, seperti argon atau campuran argon dengan karbon dioksida, dalam proses ini memainkan peran penting dalam melindungi zona las dari kontaminasi atmosfer, seperti oksigen dan

nitrogen, yang dapat menyebabkan porositas dan inklusi pada sambungan las. Hal ini memungkinkan pembentukan las yang lebih bersih dan memiliki integritas mekanis yang tinggi. Kawat las solid menawarkan keuntungan dalam hal kecepatan pengelasan dan kemudahan penggunaan, menjadikannya pilihan populer untuk produksi industri dan aplikasi perbaikan (Aloraier et al., 2012).

Keunggulan lain dari penggunaan kawat las solid termasuk kemampuan untuk menghasilkan las dengan penampilan yang rapi dan halus serta minimnya kebutuhan untuk pembersihan pasca pengelasan, berkat minimnya residu slag. Selain itu, kawat las solid tersedia dalam berbagai diameter dan komposisi paduan, memungkinkan pengelas untuk memilih material yang paling sesuai dengan kebutuhan spesifik proyek, baik itu untuk pengelasan baja karbon rendah, stainless steel, aluminium, atau logam lainnya. Namun, meskipun memiliki banyak keuntungan, penggunaan kawat las solid juga memerlukan perhatian khusus terhadap pengaturan parameter pengelasan, seperti arus listrik, kecepatan pemberian kawat, dan jarak busur, untuk memastikan hasil las yang optimal. Selain itu, peralatan pengelasan untuk GMAW cenderung lebih kompleks dan mahal dibandingkan dengan metode pengelasan lainnya, yang mungkin membatasi penggunaannya di lingkungan dengan anggaran yang terbatas. Kesimpulannya, kawat las solid dalam proses GMAW menawarkan solusi pengelasan yang efisien dan fleksibel untuk berbagai aplikasi pengelasan, memberikan kombinasi antara kecepatan, kualitas, dan kemudahan penggunaan yang sulit ditandingi oleh metode pengelasan

lain. Penggunaannya yang luas dalam industri manufaktur dan perbaikan menggarisbawahi pentingnya kawat ini dalam kemajuan teknologi pengelasan modern (Liu et al., 2021).

Batangan logam atau paduan, yang umumnya dikenal sebagai batu las atau welding rods, memegang peran krusial dalam dunia pengelasan, khususnya dalam metode pengelasan TIG (*Tungsten Inert Gas*) dan pengelasan oksasi-asetilena. Batu las ini digunakan sebagai bahan pengisi yang mencair selama proses pengelasan untuk membentuk sambungan antara dua logam atau lebih. Dalam pengelasan TIG, elektroda tungsten yang tidak habis terpakai digunakan untuk membangkitkan busur pengelasan, sementara batu las secara manual ditambahkan ke kolam las untuk mengisi sambungan. Proses ini memungkinkan kontrol yang sangat tinggi atas pengelasan, menjadikannya ideal untuk aplikasi yang memerlukan presisi tinggi dan kualitas las yang superior (Liu et al., 2021).

Di sisi lain, dalam pengelasan oksasi-asetilena, batu las berfungsi sebagai sumber material pengisi yang dilelehkan oleh nyala api dari pembakaran gas asetilena dan oksigen. Proses ini, meski lebih tradisional, masih banyak digunakan untuk aplikasi tertentu karena kemudahannya dalam mengatur suhu dan kecepatan pengelasan, yang dapat disesuaikan dengan berbagai jenis material dan ketebalan. Batu las tersedia dalam berbagai komposisi untuk menyamakan atau meningkatkan sifat-sifat material dasar yang dilas. Misalnya, untuk pengelasan baja tahan karat, batu las khusus yang mengandung unsur seperti kromium dan nikel digunakan untuk memastikan bahwa sambungan las memiliki ketahanan

korosi yang setara dengan material dasar. Sementara itu, untuk aluminium dan paduannya, batu las dengan elemen seperti silikon atau magnesium ditambahkan untuk meningkatkan kekuatan sambungan dan mengurangi kerapuhan (Aloraier et al., 2012).

Penggunaan batu las yang tepat sangat penting dalam menghasilkan las yang tidak hanya kuat secara mekanis tetapi juga tahan terhadap pengaruh lingkungan seperti korosi atau kelelahan. Oleh karena itu, pemilihan batu las yang sesuai dengan material dasar dan persyaratan aplikasi pengelasan merupakan langkah penting dalam proses pengelasan. Ini menuntut pengelas memiliki pengetahuan mendalam tentang sifat material dan pengalaman praktis dalam pengelasan untuk dapat memilih batu las yang paling cocok. Secara keseluruhan, batu las merupakan elemen penting yang berkontribusi terhadap kualitas dan keandalan sambungan las, memungkinkan pengelasan presisi tinggi pada berbagai aplikasi, dari perbaikan sederhana hingga konstruksi kompleks dalam industri berat. Ketersediaan beragam jenis batu las memastikan bahwa hampir setiap kebutuhan pengelasan dapat dipenuhi, memberikan fleksibilitas dan adaptabilitas dalam teknik pengelasan (García et al., 2002).

Kemudian, Fluks dalam pengelasan memegang peranan vital yang tak terpisahkan dari proses pembuatan sambungan las yang berkualitas. Sebagai bahan kimia yang kaya fungsi, fluks bertugas melakukan tiga peran utama: membersihkan logam dasar, melindungi zona las dari oksidasi, dan mempengaruhi karakteristik las. Bentuknya yang bisa berupa

bubuk, pasta, atau lapisan yang dibungkus di sekitar elektroda menunjukkan fleksibilitas penggunaannya dalam berbagai metode pengelasan. Pada dasarnya, fluks bekerja dengan menghasilkan gas saat dipanaskan yang kemudian membentuk lapisan pelindung atas kolam las, menghalangi interaksi langsung antara material cair dengan atmosfer yang dapat menimbulkan oksidasi atau kontaminasi. Selain itu, fluks juga membantu dalam stabilisasi busur pengelasan, yang kritis untuk memastikan konsistensi dan kualitas sambungan las. Dalam proses seperti pengelasan busur terendam (Submerged Arc Welding - SAW), fluks berperan dalam menyerap kontaminan yang mungkin ada di permukaan logam, meningkatkan integritas dan kekuatan mekanis dari sambungan las (García et al., 2002).

Keberadaan fluks sangat penting dalam proses pengelasan yang membutuhkan penambahan material pengisi, seperti dalam pengelasan TIG (*Tungsten Inert Gas*) dan pengelasan oksasi-asetilena, di mana fluks membantu menghasilkan hasil las yang lebih bersih dan bebas dari cacat. Khususnya dalam pengelasan oksasi-asetilena, fluks berfungsi mengoptimalkan proses pembakaran dan pencairan logam pengisi serta logam dasar, memastikan adhesi yang baik dan sambungan las yang kuat. Pemilihan jenis fluks yang tepat sangat penting, sebab berbagai komposisi fluks dirancang untuk aplikasi spesifik, berdasarkan jenis logam yang dilas dan hasil akhir yang diinginkan. Misalnya, fluks dengan kandungan silika tinggi cocok untuk pengelasan logam yang memerlukan suhu leleh tinggi, sedangkan fluks dengan kandungan kalium bisa meningkatkan keluwesan

dan kehalusan hasil las pada logam dengan suhu leleh lebih rendah. Dalam industri pengelasan modern, inovasi material fluks terus berkembang, mendorong efisiensi proses pengelasan dan menghasilkan sambungan las dengan kualitas lebih tinggi. Hal ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan durabilitas material las, tetapi juga pada efisiensi produksi dan keberlanjutan lingkungan, mengingat penggunaan fluks yang tepat dapat mengurangi kebutuhan akan pasca-pengelasan dan perlakuan kimiawi tambahan (Aloraier et al., 2012).

Selanjutnya, gas pelindung dalam pengelasan memainkan peran krusial dalam menjaga integritas dan kualitas sambungan las. Gas-gas ini, seperti argon, helium, karbon dioksida, dan campuran gas, digunakan untuk melindungi zona las dari kontaminasi atmosfer yang dapat merusak sambungan las. Misalnya, argon dan helium digunakan karena sifat inert mereka yang tidak bereaksi dengan logam cair, sehingga memungkinkan pembentukan las yang bersih dan bebas dari oksidasi. Karbon dioksida, meskipun sedikit reaktif, sering digunakan dalam pengelasan MIG (Metal Inert Gas Welding) karena kemampuannya dalam memberikan penetrasi las yang dalam pada biaya yang lebih rendah (Sitthipong et al., 2017).

Logam pengisi, di sisi lain, adalah material yang ditambahkan ke zona las untuk membentuk sambungan las. Material ini termasuk kawat las, batang las, dan bahan lain yang komposisinya serupa atau kompatibel dengan material dasar yang dilas. Dalam pengelasan TIG (*Tungsten Inert Gas*), misalnya, batang las digunakan sebagai bahan pengisi untuk menambah material ke kolam las, memungkinkan pengelasan untuk

mengontrol jumlah material pengisi yang ditambahkan dan, dengan demikian, karakteristik sambungan las. Penggunaan logam pengisi yang tepat sangat penting untuk memastikan bahwa sambungan las memiliki kekuatan mekanis, ketahanan korosi, dan sifat fisik lainnya yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Kombinasi penggunaan gas pelindung dan logam pengisi dalam pengelasan memastikan bahwa proses pengelasan dapat diadaptasi untuk memenuhi kebutuhan spesifik dari berbagai jenis logam dan aplikasi pengelasan. Dengan pemilihan gas pelindung dan logam pengisi yang tepat, pengelas dapat menghasilkan sambungan las yang tidak hanya kuat dan tahan lama tetapi juga memenuhi standar kualitas dan keamanan tertinggi (Kodama et al., 2004).

Kemudian, bahan tambahan dalam pengelasan, yang dikenal sebagai additives, memainkan peran krusial dalam menyesuaikan dan meningkatkan sifat-sifat lasan, seperti kekuatan, ketahanan terhadap korosi, dan kemudahan pengelasan. Additives ini bisa berupa elemen atau senyawa yang ditambahkan ke dalam material pengelasan untuk mencapai tujuan spesifik, seperti meningkatkan fluiditas logam las, mengurangi inklusi, atau menambahkan elemen paduan tertentu yang akan meningkatkan performa sambungan las. Penggunaan bahan tambahan memungkinkan pengelas untuk mengontrol lebih lanjut komposisi kimia dari kolam las, sehingga mempengaruhi langsung mikrostruktur dan sifat mekanis dari sambungan las yang dihasilkan. Hal ini sangat penting dalam aplikasi yang memerlukan spesifikasi material yang ketat, seperti dalam

industri kedirgantaraan, otomotif, dan pembangkit tenaga (Sitthipong et al., 2017).

Di sisi lain, kawat las khusus seperti aluminium, stainless steel, dan logam spesial lainnya dirancang untuk memenuhi kebutuhan pengelasan material tertentu, menawarkan kompatibilitas dan kinerja yang optimal untuk aplikasi spesifik. Kawat las ini telah disesuaikan komposisinya untuk memastikan bahwa sambungan las memiliki karakteristik yang harmonis dengan material dasar, seperti kecocokan termal, kekuatan mekanis, dan ketahanan terhadap korosi. Misalnya, kawat las aluminium sering kali mengandung silikon atau magnesium untuk meningkatkan kekuatan las dan mengurangi retak panas, sedangkan kawat las untuk stainless steel mungkin mengandung molybdenum atau nikel untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Penggunaan kawat las yang spesifik ini memungkinkan pembuatan produk yang tidak hanya kuat dan tahan lama tetapi juga memenuhi standar industri dan regulasi keselamatan. Melalui pemilihan bahan tambahan dan kawat las yang tepat, proses pengelasan menjadi sangat fleksibel, memungkinkan pembuatan sambungan las yang dapat diandalkan untuk berbagai aplikasi, dari konstruksi sipil hingga fabrikasi peralatan sensitif. Hal ini menunjukkan pentingnya pemahaman mendalam tentang karakteristik material pengelasan dan bagaimana mereka berinteraksi dengan material dasar serta lingkungan operasional (Reisgen et al., 2020).

Material pengelasan, khususnya *flux core* 81 T, menjadi komponen kritis dalam proses pengelasan terutama untuk aplikasi yang memerlukan

kekuatan tinggi dan ketahanan terhadap kondisi operasional yang berat. Penggunaan *flux core 81 T* dalam penelitian terkait perbaikan Tumbler pada *Excavator Hitachi 3600* menyoroti pentingnya pemilihan material pengelasan yang tepat untuk meningkatkan durabilitas dan keandalan perbaikan. *Flux core 81 T* merupakan jenis kawat las flux-cored yang dirancang untuk memberikan penetrasi las yang baik dan efisiensi material yang tinggi. Kawat ini dipilih karena keunggulannya dalam menghasilkan sambungan las yang kuat, yang sangat penting untuk aplikasi perbaikan di industri konstruksi dan pertambangan. Selain itu, karakteristik *flux core 81 T* yang dapat mengurangi potensi cacat pengelasan, seperti porositas atau retakan, menjadikannya pilihan yang ideal untuk perbaikan komponen yang kritis seperti Tumbler *excavator* (García et al., 2002).

*Flux core 81 T* digunakan untuk mengkaji pengaruh penggunaan material pengelasan dan variasi kekerasan plate (HB 150, HB 255, dan HB 400) terhadap karakteristik kekerasan dan kekuatan tarik hasil pengelasan. Hal ini bertujuan untuk mengidentifikasi praktik pengelasan terbaik yang tidak hanya memperpanjang umur operasional Tumbler tetapi juga mempertahankan integritas strukturalnya, yang sangat penting untuk menjamin operasi yang aman dan efisien pada *excavator* di lingkungan kerja yang menantang (Reisgen et al., 2019).

Penelitian ini memberikan wawasan teoritis tentang karakteristik berbagai jenis material plate dan bagaimana mereka berinteraksi dengan teknik pengelasan tertentu, termasuk penggunaan *flux core 81 T*. Ini akan memperluas pemahaman tentang prinsip-prinsip material science dalam

konteks aplikasi praktis dan memberikan kontribusi signifikan terhadap ilmu material dan mekanika, khususnya dalam konteks pemilihan material dan teknik pengelasan yang optimal untuk alat berat. Manfaat praktis dari penelitian ini mencakup kemampuan industri konstruksi dan pertambangan untuk mengadopsi metode pengelasan yang lebih efektif untuk perbaikan *Tumbler excavator*. Hal ini dapat meningkatkan durabilitas dan keandalan komponen yang diperbaiki, membantu perusahaan dalam mengurangi biaya dan waktu yang dibutuhkan untuk perawatan dan perbaikan, serta berkontribusi pada peningkatan keselamatan kerja. Kesimpulannya, penggunaan *flux core 81 T* dalam pengelasan menawarkan potensi yang signifikan untuk meningkatkan kualitas dan keandalan perbaikan pada *excavator* dan alat berat serupa, mendukung kebutuhan industri untuk solusi pengelasan yang lebih kuat dan tahan lama (Dwivedi, 2022).

#### 5. Kekerasan Material

Kekerasan material menjadi aspek penting yang mempengaruhi kinerja dan durabilitas hasil pengelasan. Kekerasan material mengacu pada kemampuan suatu material untuk menahan deformasi, biasanya dalam bentuk penetrasi atau goresan, di bawah beban. Dalam pengelasan, pemahaman tentang kekerasan material dasar dan material pengisi sangat penting untuk memastikan bahwa sambungan las memiliki kekuatan dan keandalan yang optimal. Ada beberapa metode pengukuran kekerasan yang digunakan dalam industri, masing-masing dengan aplikasinya sendiri.

Kekerasan material adalah sifat intrinsik yang menunjukkan kemampuan sebuah material untuk menahan deformasi permanen, biasanya akibat penetrasi atau goresan. Ini merupakan indikator penting dari resistensi material terhadap abrasi, erosi, atau bentuk keausan lainnya. Dalam konteks teknik, pengukuran kekerasan material menjadi sangat penting karena memberikan insight mengenai kekuatan, durabilitas, dan kemampuan material tersebut untuk digunakan dalam aplikasi spesifik (Sitthipong et al., 2017).

Secara umum, kekerasan material diukur melalui berbagai metode pengujian yang dirancang untuk menilai seberapa besar resistensi material terhadap penetrasi objek keras. Beberapa metode pengujian kekerasan yang paling umum digunakan termasuk Brinell, Vickers, Rockwell, dan Mohs, masing-masing dengan prosedur dan skala pengukurannya sendiri. Misalnya, pengujian kekerasan Brinell melibatkan penginderaan bola baja ke dalam material dan mengukur diameter lekukan yang dihasilkan, sedangkan pengujian Rockwell mengukur kedalaman penetrasi indenter berbentuk kerucut atau bola dibawah beban tertentu (Ito et al., 2021).

Kekerasan material tidak hanya mencerminkan kemampuan material untuk menahan deformasi tetapi juga terkait erat dengan properti material lainnya seperti kekuatan, ketahanan terhadap retak, dan ketahanan terhadap abrasi. Sebagai contoh, material dengan kekerasan tinggi sering kali memiliki resistensi yang baik terhadap abrasi tetapi mungkin lebih rentan terhadap kerapuhan atau kegagalan melalui patah rapuh. Dalam aplikasi praktis, pemahaman tentang kekerasan material memungkinkan

insinyur dan desainer untuk membuat keputusan yang tepat tentang pemilihan material, desain komponen, dan proses pembuatan yang optimal. Hal ini sangat relevan dalam industri pengelasan dan fabrikasi, di mana kekerasan material dasar dan material pengisi perlu dipertimbangkan secara cermat untuk memastikan kualitas sambungan las dan kinerja produk akhir yang diinginkan. Kesimpulannya, kekerasan material adalah karakteristik kunci yang memberikan pandangan mendalam tentang sifat mekanis dan aplikasi potensial dari berbagai material, memainkan peran penting dalam desain, pemilihan material, dan evaluasi kinerja produk dalam teknik dan manufaktur (Kodama et al., 2004).

Ada beberapa metode pengukuran kekerasan yang digunakan dalam industri, masing-masing dengan aplikasinya sendiri. Pertama, metode pengukuran kekerasan Brinell (HB) merupakan salah satu teknik paling umum yang digunakan untuk mengukur kekerasan material, khususnya untuk material dengan kekerasan rendah hingga sedang. Proses ini melibatkan penggunaan bola baja keras yang ditekan ke dalam permukaan material yang akan diuji dengan beban tertentu selama periode waktu yang ditentukan. Diameter indentasi yang dihasilkan oleh tekanan bola ini kemudian diukur menggunakan mikroskop. Nilai kekerasan Brinell dihitung menggunakan rumus berikut:

$$HBW = \frac{2p}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Dimana:

HB = Nilai kekerasan Brinell

P = Beban yang diterapkan pada bola baja.

D = Diameter bola baja (dalam milimeter)

d = Diameter indentasi yang dihasilkan (dalam milimeter).

Rumus nilai kekerasan Brinell menghitung nilai kekerasan material dengan mengukur area permukaan indentasi yang ditinggalkan oleh bola. Kekerasan Brinell menawarkan gambaran yang baik tentang kemampuan material untuk menahan abrasi dan penetrasi, dan secara luas digunakan dalam industri untuk menilai kekerasan logam dan paduan. Metode ini cocok untuk material yang lebih lunak, seperti baja lunak, aluminium, dan paduan tembaga, karena menghasilkan indentasi yang cukup besar untuk diukur dengan akurat. Namun, metode ini kurang efektif untuk material sangat keras atau material yang sangat tipis, karena bisa menyebabkan kerusakan pada bola pengukur atau tidak menghasilkan indentasi yang cukup jelas untuk diukur.

Metode lain, pengukuran kekerasan Vickers (HV) merupakan metode yang lebih canggih dan serbaguna untuk mengukur kekerasan material, menggunakan piramida berlian sebagai indenter. Berbeda dengan pengukuran Brinell yang menggunakan bola baja, metode Vickers mengaplikasikan beban melalui indenter berbentuk piramida berlian ke permukaan material yang diuji. Keunikan dari metode ini adalah

kemampuannya untuk memberikan hasil yang akurat untuk berbagai jenis material, dari yang sangat lunak hingga sangat keras, menjadikannya pilihan yang lebih fleksibel dibandingkan metode pengukuran kekerasan lainnya.

Pengukuran kekerasan Vickers, beban tertentu diterapkan pada indenter berlian selama durasi waktu yang ditentukan. Setelah beban diangkat, ukuran indentasi yang ditinggalkan - yang memiliki bentuk piramida persegi - diukur menggunakan mikroskop. Nilai kekerasan Vickers kemudian dihitung berdasarkan formula:

$$HV = \frac{2F \sin^2(\theta/2)}{d^2} = \frac{1,8544F}{d^2}$$

di mana:

HV = Kekerasan Vickers,

F = Beban yang diterapkan pada indenter (dalam Newton),

$\theta$  adalah sudut antara dua sisi berlawanan dari piramida (biasanya  $136^\circ$  untuk Vickers),

D = Panjang diagonal rata-rata dari indentasi (dalam milimeter).

Keakuratan dan fleksibilitas metode Vickers memungkinkannya untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, memberikan data penting untuk penelitian material, pengembangan produk, dan kontrol kualitas. Kekerasan Vickers sering digunakan dalam industri untuk mengevaluasi material yang membutuhkan tingkat presisi tinggi dalam pengukuran kekerasan, seperti komponen dalam industri penerbangan, otomotif, dan alat presisi. Selain itu, karena skala Vickers kontinu dan dapat

diaplikasikan pada hampir semua jenis material, metode ini memberikan cara yang konsisten untuk membandingkan kekerasan antar material yang berbeda.

Terakhir, Pengukuran kekerasan Rockwell (HR) adalah salah satu metode yang paling cepat dan luas digunakan untuk mengukur kekerasan material, terutama logam. Metode ini menggunakan indenter berbahan berlian atau bola baja yang ditekan ke dalam permukaan material dengan beban tertentu. Yang membedakan pengukuran Rockwell dari metode kekerasan lainnya adalah pengukurannya yang berfokus pada kedalaman penetrasi indenter, bukan ukuran indentasi yang dihasilkan.

Dalam metode Rockwell, ada beberapa skala pengukuran yang digunakan, masing-masing ditandai dengan huruf, seperti skala A, B, C, dan lain-lain, yang menunjukkan kombinasi dari jenis indenter dan beban yang digunakan. Skala ini memungkinkan metode Rockwell untuk menyesuaikan dengan berbagai jenis material dari yang sangat lunak hingga yang sangat keras. Misalnya, skala C, yang menggunakan indenter berlian dan beban seberat 150 kg, sering digunakan untuk mengukur material keras seperti baja. Sedangkan skala B, yang menggunakan indenter bola baja dan beban 100 kg, cocok untuk material yang lebih lunak.

Rumus dasar untuk pengukuran kekerasan Rockwell adalah sebagai berikut:

$$HR = N - \frac{d}{s}$$

Dimana  $N$  adalah nilai konstanta yang berbeda untuk setiap skala (misalnya, 100 untuk skala B dan C,  $d$  adalah kedalaman penetrasi dalam mikrometer, dan  $s$  adalah faktor skala yang tergantung pada jenis skala pengukuran yang digunakan.

Kecepatan dan kemudahan penggunaan metode Rockwell menjadikannya sangat populer dalam industri untuk kontrol kualitas dan pengujian material. Tidak memerlukan pengukuran indentasi setelah penerapan beban memungkinkan pengujian yang lebih cepat dibandingkan dengan metode Brinell atau Vickers. Namun, seperti semua metode pengukuran kekerasan, pengukuran Rockwell memiliki keterbatasan dan harus dipilih berdasarkan kesesuaian dengan material dan kebutuhan aplikasi yang spesifik (Kessler et al., 2021).

Untuk meninjau pengaruh kekerasan material terhadap proses pengelasan, perlu dipahami bahwa kekerasan material dapat memengaruhi beberapa aspek kritis dalam proses pengelasan. Berikut adalah beberapa dampak utama kekerasan material terhadap proses pengelasan (Kazemi & Ahmadi, 2024).

- a. Pemilihan Elektroda dan Parameter Pengelasan menjadi krusial dalam proses pengelasan. Material yang memiliki tingkat kekerasan yang tinggi seringkali sulit untuk dilarutkan atau dilelehkan selama proses tersebut. Oleh karena itu, menjadi penting untuk memilih elektroda yang sesuai dan menyesuaikan parameter pengelasan dengan cermat. Faktor-faktor seperti arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan harus dipertimbangkan dengan seksama, dengan mempertimbangkan

tingkat kekerasan dari material yang akan dilas. Hanya dengan pendekatan yang hati-hati dalam pemilihan elektroda dan penyesuaian parameter, proses pengelasan dapat dilakukan dengan efektif dan hasil yang memuaskan bisa dicapai.

- b. Peleburan dan Penggabungan Material menjadi tantangan utama ketika menghadapi material dengan tingkat kekerasan yang tinggi dalam proses pengelasan. Kekerasan yang tinggi seringkali menghambat kemampuan untuk melelehkan dan menggabungkan material secara efektif. Dampaknya dapat terlihat dalam kesulitan mencapai penetrasi yang memadai pada sambungan pengelasan, yang pada gilirannya dapat menyebabkan kelemahan struktural pada hasil akhir. Oleh karena itu, pengelolaan dengan cermat proses peleburan dan penggabungan material menjadi kunci dalam menangani material dengan kekerasan yang tinggi selama proses pengelasan.
- c. Risiko Retak menjadi salah satu tantangan utama ketika menangani material yang keras dalam proses pengelasan. Material yang keras cenderung rentan terhadap retak dan patah saat dipanaskan secara lokal selama proses pengelasan. Pemanasan yang terlokalisasi dapat menyebabkan ketegangan yang tidak merata di sepanjang sambungan pengelasan, khususnya pada zona panas yang terpengaruh oleh panas yang tinggi. Faktor lain yang memperparah risiko retak adalah adanya ketidakcocokan sifat mekanis antara logam las dan material dasar. Jika tidak dikelola dengan hati-hati, retakan yang terjadi dapat menurunkan kekuatan dan integritas struktural dari sambungan

- pengelasan tersebut. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang karakteristik material dan penggunaan teknik pengelasan yang sesuai menjadi penting dalam mengurangi risiko retak saat menangani material yang keras. Hal ini penting untuk memastikan hasil akhir dari proses pengelasan yang berkualitas dan tahan lama.
- d. Kerapuhan dan Sifat Mekanis merupakan aspek yang sangat penting dalam pengelasan material yang keras. Proses pengelasan pada material yang keras dapat mempengaruhi secara signifikan sifat mekanis dari sambungan yang dihasilkan. Tanpa perhatian yang cermat, pengelasan pada material yang keras dapat menghasilkan sambungan yang rentan terhadap kerapuhan atau deformasi plastis yang tidak diinginkan. Faktor-faktor seperti struktur mikro, distribusi unsur paduan, dan panas yang dihasilkan selama pengelasan semuanya memainkan peran kunci dalam menentukan sifat mekanis akhir dari sambungan pengelasan. Oleh karena itu, sangat penting untuk memperhatikan parameter pengelasan yang tepat, termasuk pengaturan suhu, laju pendinginan, dan perlakuan panas pasca-pengelasan untuk meminimalkan risiko kerapuhan dan memastikan bahwa sambungan pengelasan memiliki sifat mekanis yang diinginkan dan sesuai dengan aplikasi yang diinginkan. Dengan pendekatan yang tepat, pengelasan pada material yang keras dapat menghasilkan sambungan yang kuat, tahan lama, dan sesuai dengan kebutuhan teknis yang diperlukan.

e. Pra-Penanganan Material memainkan peran kunci dalam mempersiapkan material yang akan dilas untuk proses pengelasan. Sebelum memulai proses pengelasan, seringkali diperlukan langkah-langkah pra-penanganan untuk mengurangi kekerasan dan meningkatkan keuletan material. Langkah-langkah ini dapat berupa pemanasan pra, di mana material dipanaskan pada suhu tertentu sebelum proses pengelasan dimulai. Pemanasan pra ini bertujuan untuk mengurangi kekerasan material dan membuatnya lebih mudah untuk dikerjakan selama proses pengelasan. Selain itu, proses pemanasan ulang juga dapat diterapkan pada material yang memiliki struktur kristal yang rumit untuk menghilangkan ketegangan dan meningkatkan keuletan. Perlakuan panas lainnya juga dapat digunakan, tergantung pada karakteristik material yang akan dilas. Dengan melakukan pra-penanganan yang sesuai, material yang awalnya keras dapat diubah menjadi lebih mudah untuk dikerjakan, sehingga meningkatkan kualitas dan kekuatan sambungan pengelasan. Oleh karena itu, pra-penanganan material merupakan langkah yang penting dalam memastikan keberhasilan proses pengelasan pada material yang keras.

Untuk mempertimbangkan faktor-faktor ini saat merencanakan dan melaksanakan proses pengelasan pada material yang keras untuk memastikan kualitas sambungan pengelasan yang optimal dan mencegah kegagalan struktural yang tidak diinginkan sangatlah penting.

Material	Skala Kekerasan	Nilai Kekerasan
ASTM A36	Brinell (HB)	111
HB 255	Brinell (HB)	255
HB 400	Brinell (HB)	400

**Tabel 2. 2** Perbandingan kekerasan ASTM A36/HB111, HB 255, dan HB 400

Perbandingan kekerasan antara tiga material yang berbeda dapat memberikan wawasan yang berharga dalam memilih material yang sesuai untuk aplikasi tertentu. Material pertama, ASTM A36/HB 111, memiliki skala kekerasan Brinell (HB) berkisar 111. Material kedua, dengan nilai HB 255, menunjukkan tingkat kekerasan yang lebih tinggi daripada ASTM A36/HB 111. Sedangkan material ketiga, dengan nilai HB 400, menunjukkan tingkat kekerasan yang jauh lebih tinggi lagi. Perbedaan dalam skala kekerasan ini mencerminkan perbedaan dalam sifat-sifat material, seperti kekuatan dan keuletan. Misalnya, material dengan kekerasan yang lebih tinggi cenderung lebih tahan terhadap deformasi plastis dan aus, tetapi juga mungkin lebih sulit untuk diproses atau diubah bentuknya. Oleh karena itu, pemilihan material harus mempertimbangkan tidak hanya kekerasan, tetapi juga sifat-sifat mekanis lainnya serta persyaratan aplikasi spesifik. Dengan memahami perbedaan dalam nilai kekerasan ini, pengguna dapat membuat keputusan yang lebih tepat dalam pemilihan material untuk memastikan kinerja optimal dalam aplikasi yang diinginkan.

Kesimpulannya, ASTM A36/HB 111 merupakan pilihan yang tepat untuk aplikasi umum di mana tidak diperlukan tingkat kekerasan

yang tinggi. Material ini menawarkan kekuatan yang memadai untuk berbagai keperluan konstruksi dan manufaktur tanpa kebutuhan akan tingkat kekerasan yang ekstrem. Di sisi lain, HB 255 cocok untuk aplikasi di mana diperlukan tingkat kekerasan yang sedikit lebih tinggi daripada ASTM A36/HB 111, namun tidak setinggi HB 400. Material dengan nilai HB 255 ini biasanya digunakan ketika dibutuhkan kekuatan tambahan tanpa memerlukan kekerasan yang sangat tinggi. Sedangkan HB 400 menjadi pilihan yang ideal untuk aplikasi di mana diperlukan tingkat kekerasan yang tinggi, seperti pada alat-alat permesinan. Material dengan nilai kekerasan yang tinggi ini mampu menahan tekanan dan keausan yang tinggi, menjadikannya cocok untuk lingkungan kerja yang keras dan tuntutan aplikasi yang memerlukan ketahanan yang luar biasa. Dengan memahami karakteristik dan kebutuhan aplikasi masing-masing material, pemilihan yang tepat dapat dilakukan untuk memastikan kinerja optimal dan keamanan dalam berbagai penggunaan.

#### 6. Kekuatan Tarik

Dalam konteks material Teknik (Aloraier et al., 2012), kekuatan tarik merujuk pada kemampuan suatu material untuk menahan gaya tarik atau tegangan sebelum mengalami perubahan permanen atau patah. Ini adalah salah satu sifat mekanis yang sangat penting dalam desain dan penggunaan material, karena sering kali menggambarkan seberapa kuat material tersebut dalam menahan beban tarik atau tegangan yang diberikan. Kekuatan tarik menjadi faktor penentu dalam menentukan kekuatan struktural suatu benda atau komponen, baik dalam aplikasi

konstruksi bangunan, mesin, kendaraan, maupun peralatan lainnya. Dalam proses pemilihan material, pemahaman yang baik tentang kekuatan tarik material sangatlah krusial, karena memastikan bahwa material yang dipilih mampu menahan beban yang diinginkan dengan aman dan efisien.

Kekuatan tarik juga dapat dilihat dari perspektif keamanan dan keandalan. Material dengan kekuatan tarik yang memadai dapat membantu mencegah kegagalan struktural yang tidak diinginkan, seperti retak atau patah, yang dapat mengakibatkan kecelakaan atau kerugian materi. Selain itu, dalam industri seperti otomotif, penerbangan, dan pembangkit energi, di mana keandalan dan ketahanan terhadap tekanan dan kondisi ekstrem sangat penting, kekuatan tarik yang tinggi menjadi kriteria utama dalam pemilihan material. Dengan memperhitungkan kekuatan tarik yang sesuai, insinyur dan desainer dapat merancang struktur atau komponen yang dapat beroperasi secara aman dan efektif dalam lingkungan yang menuntut (Li et al., 2020).

Selain keamanan dan keandalan, kekuatan tarik juga mempengaruhi kinerja dan efisiensi material dalam berbagai aplikasi. Material dengan kekuatan tarik yang tinggi memungkinkan desain yang lebih ringkas dan ringan, karena dapat menahan beban yang sama dengan material yang lebih berat namun dengan kekuatan tarik yang lebih rendah. Ini berarti, dalam banyak kasus, material dengan kekuatan tarik yang tinggi dapat menghasilkan struktur atau komponen yang lebih efisien secara energi dan ekonomi. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang kekuatan tarik material memungkinkan pengoptimalan desain dan

penggunaan material dalam berbagai aplikasi teknik, baik dari segi kinerja, keamanan, maupun efisiensi (García et al., 2002).

Selanjutnya, ada faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan tarik. Faktor pertama yang memengaruhi kekuatan tarik hasil pengelasan adalah pemilihan bahan pengelasan yang tepat. Kekuatan tarik dari sambungan pengelasan sangat dipengaruhi oleh material yang digunakan untuk pengelasan tersebut. Material yang memiliki kompatibilitas kimia dan struktural yang baik dengan material dasar akan cenderung menghasilkan sambungan pengelasan yang lebih kuat. Selain itu, karakteristik mekanis dari bahan pengelasan, seperti kekuatan dan keuletan, juga berpengaruh pada kekuatan tarik akhir dari sambungan pengelasan (Piolle, 2021).

Faktor kedua adalah persiapan permukaan dan kondisi sambungan. Kualitas permukaan dan kondisi sambungan yang baik sangat penting dalam memastikan kekuatan tarik yang optimal dari sambungan pengelasan. Permukaan yang bersih dan bebas dari kontaminan seperti karat, oksida, atau kotoran lainnya akan meningkatkan penetrasi pengelasan dan mengurangi risiko terbentuknya cacat pada sambungan. Selain itu, pemosisian dan penyusunan bagian yang akan disambung juga memainkan peran penting dalam memastikan kontak yang optimal antara material yang akan digabungkan (Reisgen et al., 2020).

Faktor terakhir adalah parameter pengelasan yang digunakan selama proses pengelasan. Parameter seperti arus, tegangan, laju pengelasan, dan jenis elektroda atau bahan pengisi yang digunakan akan memengaruhi kekuatan tarik dari sambungan pengelasan. Pemilihan

parameter yang tepat sesuai dengan jenis material dan kondisi aplikasi dapat membantu memastikan bahwa sambungan pengelasan memiliki kekuatan tarik yang memadai. Selain itu, kontrol yang cermat terhadap parameter pengelasan juga penting untuk menghindari terjadinya cacat seperti retak atau porositas yang dapat mengurangi kekuatan tarik sambungan pengelasan secara keseluruhan. Dengan memperhatikan faktor-faktor ini secara menyeluruh, proses pengelasan dapat menghasilkan sambungan yang memiliki kekuatan tarik yang optimal untuk memenuhi kebutuhan aplikasi teknik yang diinginkan (Weber & Göklü, 2006).

Metodologi pengujian kekuatan tarik untuk material pengelasan melibatkan beberapa langkah penting yang memungkinkan evaluasi yang cermat terhadap kualitas dan kekuatan sambungan pengelasan. Pertama adalah uji tarik standar, di mana sampel pengelasan disiapkan dengan dimensi yang sesuai dengan standar yang berlaku. Selanjutnya, sampel diberi beban tarik secara perlahan menggunakan mesin uji tarik hingga terjadi kegagalan pada sambungan pengelasan. Selama proses ini, tegangan dan regangan dari sampel terus dipantau menggunakan alat pengukur yang tepat untuk memperoleh kurva tegangan-regangan. Dari kurva ini, dapat diidentifikasi titik yield, titik patah, dan kekuatan tarik maksimum dari sambungan pengelasan, memberikan wawasan tentang kualitas dan kekuatan material yang diuji (Yuan et al., 2016).

Metode kedua yang umum digunakan adalah uji impak Charpy. Dalam uji ini, sampel pengelasan disiapkan dalam bentuk pendekatan

Charpy dengan dimensi yang ditentukan. Kemudian, sampel dipukul oleh palu tumpul dengan energi tertentu pada titik yang ditentukan. Selama pukulan, energi yang diserap oleh sampel direkam. Kemampuan sampel untuk menyerap energi pukulan memberikan indikasi tentang kekuatan dan keuletan sambungan pengelasan. Hasil dari uji ini juga dapat digunakan untuk mengevaluasi ketangguhan material dalam menghadapi beban impact yang tidak terduga (Yuan et al., 2016).

Metode ketiga adalah uji mikrostruktur. Dalam uji ini, sampel pengelasan dipotong dan dipersiapkan untuk pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop metalurgi. Dengan memperbesar struktur mikro, peneliti dapat mengevaluasi zona pengaruh panas, zona terpengaruh panas, dan zona dasar logam pada sambungan pengelasan. Observasi mikrostruktur ini memungkinkan penilaian terhadap integritas sambungan pengelasan, termasuk keberadaan cacat seperti porositas, retakan, atau inklusi yang dapat mempengaruhi kekuatan dan keuletan material secara keseluruhan. Dengan kombinasi metode-metode ini, para insinyur dan peneliti dapat memperoleh pemahaman yang komprehensif tentang kualitas dan kekuatan sambungan pengelasan, memungkinkan pengembangan material dan proses pengelasan yang lebih baik dan lebih andal (Weber & Göklü, 2006).

#### 7. Pengelasan *Repair pad* pada Alat Berat

*Repair pad* adalah komponen krusial dalam perawatan dan perbaikan alat berat, terutama *Excavator* Hitachi 3600. Sebagai bagian yang menanggung beban dan gesekan yang tinggi, *repair pad* berperan

penting dalam menjaga kinerja optimal serta memperpanjang masa pakai alat berat tersebut. Dalam konteks *Excavator Hitachi 3600*, *repair pad* berfungsi sebagai pelindung dan penyangga untuk bagian-bagian kritis, seperti bucket dan undercarriage, yang sering kali mengalami tekanan dan aus akibat pemakaian yang intensif. Dengan memastikan kondisi *repair pad* yang baik, potensi kerusakan pada bagian-bagian vital dapat diminimalkan, yang pada akhirnya akan meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi downtime yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, pemeliharaan dan penggantian *repair pad* secara teratur menjadi kunci dalam menjaga kinerja dan keandalan *Excavator Hitachi 3600* serta alat berat lainnya. Dengan memahami peran penting *repair pad* dan melakukan perawatan yang tepat, pemilik dan pengelola alat berat dapat memastikan operasi yang lancar dan produktif, serta mengoptimalkan investasi mereka dalam peralatan industri ini (Yuan et al., 2016).

Aplikasi pengelasan *repair pad* dalam industri merupakan contoh konkret dari bagaimana teknologi pengelasan digunakan untuk memperpanjang umur pakai dan memperbaiki komponen vital dalam berbagai sektor. Misalnya, dalam industri pertambangan, *repair pad* sering kali digunakan untuk memperbaiki dan memperkuat bagian-bagian yang terkena aus atau rusak pada peralatan berat seperti bucket *excavator*. Pengelasan *repair pad* memungkinkan operator untuk memperbaiki bagian yang rusak secara cepat dan efisien, mengurangi downtime yang mahal dan memperpanjang masa pakai peralatan. Di industri manufaktur, pengelasan *repair pad* juga digunakan untuk memperbaiki komponen

mesin yang mengalami keausan atau kerusakan akibat penggunaan berulang. Dengan menggunakan teknik pengelasan yang tepat dan bahan yang sesuai, perusahaan dapat mengembalikan kekuatan dan fungsi komponen tersebut tanpa harus menggantinya sepenuhnya, yang sering kali lebih hemat biaya. Studi kasus tentang penggunaan pengelasan *repair pad* juga dapat ditemukan di industri otomotif, pembangunan, dan perbaikan infrastruktur, serta berbagai sektor lainnya di mana perbaikan dan pemeliharaan peralatan berat dan mesin menjadi bagian penting dari operasi sehari-hari. Dengan demikian, pengelasan *repair pad* merupakan salah satu aplikasi penting dari teknologi pengelasan dalam industri modern, memungkinkan perusahaan untuk memaksimalkan penggunaan aset mereka dan menjaga produktivitas serta efisiensi operasional (Yuan et al., 2016).

#### 8. Uji *Bending*

Uji *bending* adalah metode dengan alat yang digunakan untuk melakukan pengujian kekuatan lengkung (*bending*) pada suatu bahan atau material. Pada umumnya alat uji *bending* memiliki beberapa bagian utama, seperti: rangka, alat tekan, *point bending* dan alat ukur. Rangka berfungsi sebagai penahan gaya balik yang terjadi pada saat melakukan uji *bending*. Rangka harus memiliki kekuatan lebih besar dari kekuatan alat tekan, agar tidak terjadi kerusakan pada rangka pada saat melakukan pengujian. Alat tekan berfungsi sebagai alat yang memberikan gaya tekan pada benda uji pada saat melakukan pengujian. Alat penekan harus memiliki kekuatan lebih besar dari

benda yang di uji (ditekan). *Point bending* berfungsi sebagai tumpuan benda uji dan juga sebagai penerus gaya tekan yang dikeluarkan oleh alat tekan. Panjang pendek tumpuan *point bending* berpengaruh terhadap hasil pengujian. Alat ukur adalah suatu alat yang menunjukkan besarnya kekuatan tekan yang terjadi pada benda uji.

Uji *bending* adalah suatu proses pengujian material dengan cara di tekan untuk mendapatkan hasil berupa data tentang kekuatan lengkung (*bending*) suatu material yang di uji. Proses pengujian *bending* memiliki 2 macam pengujian, yaitu 3 *point bending* dan 4 *point bending*.

Untuk melakukan uji *bending* ada factor dan aspek yang harus dipertimbangkan dan dimengerti yaitu :

a. Tekanan (p)

Tekanan adalah perbandingan antara gaya yang terjadi dengan luasan benda yang dikenai gaya. Besarnya tekanan yang terjadi dipengaruhi oleh dimensi benda yang di uji. Dimensi mempengaruhi tekanan yang terjadi karena semakin besar dimensi benda uji yang digunakan maka semakin besar pula gaya yang terjadi. Selain itu alat penekan juga mempengaruhi besarnya tekanan yang terjadi. Alat penekan yang digunakan menggunakan system hidrolik. Hal lain yang mempengaruhi besar tekanan adalah luas penampang dari torak yang digunakan. Maka daya pompa harus lebih besar dari daya yang dibutuhkan. Dan motor harus bias melebihi daya pompa, perhitungan

tekanan (Sularso & Tahara, 1983):

$$P = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

P = tekanan ( $kgf/cm^2$ )

F = gaya atau beban (kgf)

A = luas penampang (mm)

$$P = \frac{p \times Q}{600} \dots\dots\dots(2.2)$$

P = daya (kw)

p = tekanan (bar)

Q = laju aliran (l/min)

#### b. Benda uji

Benda uji adalah suatu benda yang di uji kekuatan lengkungnya dengan menggunakan alat uji *bending*. Jenis material benda uji yang digunakan sebagai benda uji sangatlah berpengaruh dalam pengujian *bending*. Karena tiap jenis material memiliki kekuatan lengkung yang berbeda-beda, yang nantinya berpengaruh terhadap hasil uji *bending* itu sendiri.

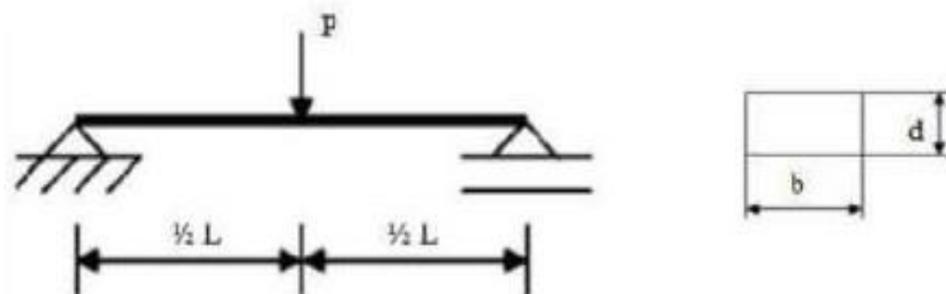
#### c. Point *Bending*

Point *bending* adalah suatu sistem atau cara dalam melakukan pengujian lengkung (*bending*). Point *bending* ini memiliki 2 tipe, yaitu: three point *bending* dan four point *bending*.

Perbedaan dari kedua cara pengujian ini hanya terletak dari bentuk dan jumlah point yang digunakan, three point *bending* menggunakan 2

point pada bagian bawah yang berfungsi sebagai tumpuan dan 1 point pada bagian atas yang berfungsi sebagai penekan sedangkan four point *bending* menggunakan 2 point pada bagian bawah yang berfungsi sebagai tumpuan dan 2 point (penekan) pada bagian atas yang berfungsi sebagai penekan.

Secara umum proses engujian *bending* memiliki 2 cara pengujian, yaitu: *Three point bending* dan *Four point bending*. Kedua cara pengujian ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing karena tiap cara pengujian memiliki cara perhitungan yang berbeda-beda. *Three point bending* adalah cara pengujian yang menggunakan 2 tumpuan dan 1 penekan.



**Tabel 2. 3** *Three point bending* (Khamid, 2011)

Perhitungan yang digunakan (West Conshohocken,1996):

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Keterangan rumus :

$\sigma_f$  = Tegangan lengkung ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

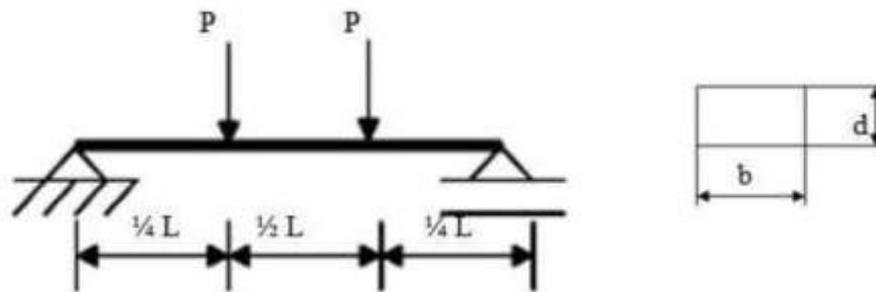
P = Beban atau Gaya yang terjadi (kgf)

L = Jarak *point* (mm)

$B$  = Lebar benda uji (mm)

$d$  = ketebalan benda uji (mm)

*Four point bending* adalah cara pengujian yang menggunakan 2 tumpuan dan 2 penekan.



**Tabel 2. 4** *Four point bending* (Khamid, 2011)

Perhitungan yang digunakan (West Conshohocken,1996):

$$\sigma_f = \frac{3PL}{4bd^2}$$

Keterangan rumus :

$\sigma_f$  = Tegangan lengkung ( $\text{kgf}/\text{mm}^2$ )

$P$  = Beban atau Gaya yang terjadi (kgf)

$L$  = Jarak *point* (mm)

$B$  = Lebar benda uji (mm)

$D$  = Ketebalan benda uji (mm)

d. Rangka

Rangka berfungsi sebagai penahan kekuatan balik dari gaya tekan yang dihasilkan oleh alat penekan pada saat proses pengujian. Selain itu rangka juga berfungsi sebagai dudukan komponen-komponen lain, sehingga ukuran dari rangka haruslah lebih besar dari

komponen-komponen tersebut.

d. Ukur

Alat ukur berfungsi sebagai pembaca data hasil pengukuran pada saat pengujian berlangsung. Angka-angka yang di tunjukkan oleh alat ukur nantinya di olah lagi dalam perhitungan untuk mendapatkan data yang inginkan. Pada umumnya alat ukur yang digunakan adalah alat pengukur tekanan.

## B. Tinjauan Pustaka

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan. Penelitian terdahulu yang telah dilakukan membawa perspektif yang beragam dan membuka peluang untuk mengidentifikasi gap literatur yang dapat diisi oleh penelitian yang akan dilakukan. Pertama penelitian berjudul "Investigation of Microstructure and Hardness Properties of Hardfacing Surface on SCM 440 Alloy Steel by Using Metal Active Gas and *Flux cored* Arc Welding Processes" (Sitthipong et al., 2017). Penelitian ini memfokuskan pada pengaruh proses pengelasan terhadap mikrostruktur dan kekerasan baja SCM 440. Meskipun memberikan wawasan penting tentang pengaruh pengelasan terhadap sifat material, terdapat gap dalam literatur mengenai aplikasinya pada komponen spesifik alat berat, seperti *Tumbler excavator*, yang akan ditangani dalam penelitian yang diusulkan. Penelitian ini akan mengkaji secara spesifik bagaimana penggunaan *flux core* 81 T dan variasi plate mempengaruhi hasil pengelasan pada *Tumbler excavator*,

memberikan data yang lebih relevan untuk aplikasi dalam industri konstruksi dan pertambangan.

Kemudian penelitian lain berjudul "Effects of Machine Instability Feedback on Safety During Digging Operation in Teleoperated *Excavators*" (Ito et al., 2021). Studi ini menyentuh aspek penting tentang keamanan dan stabilitas *excavator*. Gap literatur yang dapat diisi adalah menghubungkan bagaimana kualitas perbaikan Tumbler, terutama kekuatan dan kekerasan hasil pengelasan, mempengaruhi stabilitas keseluruhan dan keamanan *excavator* dalam operasinya.

Selanjutnya, penelitian lain berjudul "Utility Trench Backfill Compaction Using Vibratory Plate Compactor Versus *Excavator*-Mounted Hydraulic Plate Compactor" (Wang, et al, 2020). Studi ini memberikan informasi tentang tekanan operasional yang dihadapi oleh *excavator*. Penelitian yang akan dilakukan dapat mengisi gap dengan mengkaji bagaimana tekanan operasional ini mempengaruhi kebutuhan akan perbaikan yang lebih tahan lama pada Tumbler, serta bagaimana penggunaan material dan teknik pengelasan tertentu dapat memaksimalkan durabilitas.

Terakhir, penelitian berjudul "A Review on Mechanical and Hydraulic System Modeling of *Excavator* Manipulator System" (Xu & Yoon, 2016). Walaupun fokusnya pada pemodelan sistem, penelitian ini memberikan insight tentang beban kerja dan stres yang dihadapi komponen *excavator*. Penelitian yang diusulkan dapat mengeksplorasi bagaimana faktor-faktor ini mempengaruhi pilihan material dan teknik pengelasan untuk perbaikan

Tumbler, mengisi gap dalam penelitian tentang aplikasi praktis pemilihan material dan teknik pengelasan berdasarkan beban operasional.

Kesimpulannya, penelitian yang akan dilakukan berpotensi mengisi gap literatur dengan memberikan analisis terfokus pada pengaruh teknik pengelasan dan pilihan material terhadap durabilitas dan efektivitas perbaikan Tumbler *excavator*. Studi ini akan memberikan wawasan baru yang relevan untuk aplikasi praktis dalam industri, berdasarkan kebutuhan mekanis dan operasional *excavator*.

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

#### **A. Metode Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh penggunaan *flux core* 81 T terhadap kekerasan, kekuatan tarik, dan tegangan *bending* hasil pengelasan pada *repair pad tumbler Excavator Hitachi 3600*. Selain itu, penelitian ini juga akan membandingkan hasil tersebut antara penggunaan plate dengan kekerasan yang berbeda (ASTM A36/HB 111, HB 255, dan HB 400). Penelitian dilakukan melalui metode eksperimen pengelasan yang terkontrol, dengan menggunakan *flux core* 81 T sebagai material pengelasan dan plate dengan variasi kekerasan sebagai material dasar, diikuti oleh pengujian sesuai standar ASTM E8M.

#### **B. Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian ini dilaksanakan di dua lokasi utama, yaitu di workshop fabrikasi PT Bukit Makmur Mandiri Utama (BUMA) Site Lati, yang berada di bawah operasional PT Berau Coal, serta di Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Workshop fabrikasi di Site Lati digunakan sebagai tempat persiapan material dan pelaksanaan pengelasan awal, di mana material seperti ASTM A36/HB 111, HB 255, dan HB 400 dipersiapkan untuk uji mekanis. Setelah proses pengelasan di workshop, material tersebut dibawa ke Laboratorium Bahan Teknik Universitas Gadjah Mada untuk dilakukan serangkaian pengujian mekanik, termasuk uji *bending*, uji tarik, dan uji

kekerasan. Laboratorium ini dipilih karena memiliki fasilitas yang lengkap dan presisi tinggi, yang memungkinkan dilakukannya pengujian sesuai standar internasional seperti ASTM E8M, ASTM E10 dan ASTM E290. Penelitian ini berlangsung dari bulan Maret hingga Juli 2024, memberikan waktu yang cukup untuk melakukan semua tahap persiapan, pengelasan, pengujian, dan analisis data secara mendalam. Pemilihan periode ini juga mempertimbangkan kondisi operasional di lapangan dan kebutuhan metodologis penelitian.

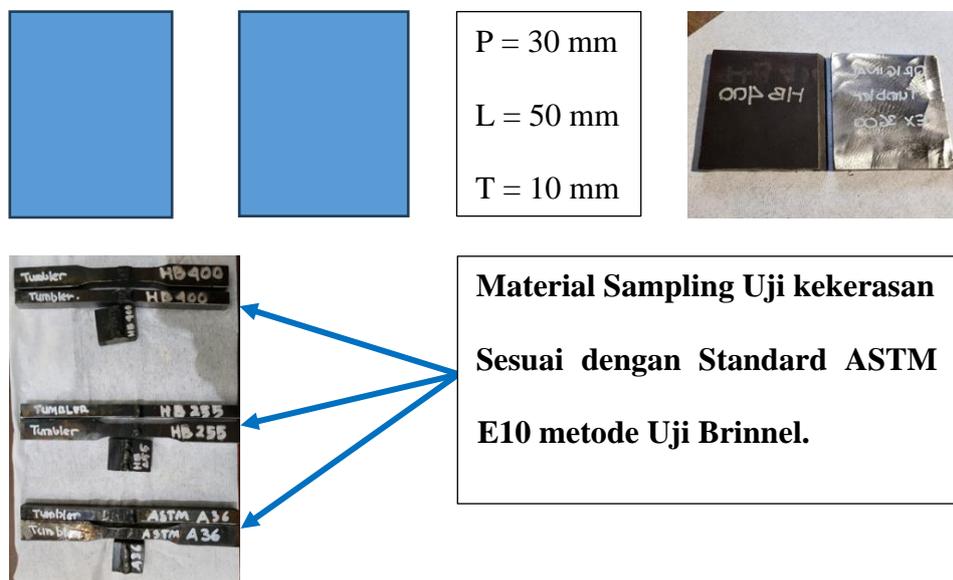
Waktu penelitian ditetapkan mulai dari bulan Maret hingga Agustus 2024. Periode ini mencakup rentang waktu enam bulan, yang memungkinkan peneliti untuk melakukan pengumpulan data, observasi lapangan, serta analisis yang mendalam terkait dengan topik penelitian yang diangkat. Keputusan untuk memilih periode ini mungkin dipengaruhi oleh kondisi operasional di lapangan, siklus kerja tahunan PT BUMA, atau karena alasan metodologis yang membutuhkan data dari berbagai musim atau kuartal operasional.

### **C. Instrumen Penelitian dan Desain Pengujian**

#### **1. Alat yang di Gunakan**

- a. Mesin Las FCAW Miller
- b. Mesin Pemotong (Gerinda Potong)
- c. Mesin Las Oksi\_Asetilin
- d. Gerinda tangan
- e. Mesin Bubut
- f. Mesin Frais
- g. Jangka Sorong/Vernier Caliper
- h. Alat Uji Kekerasan

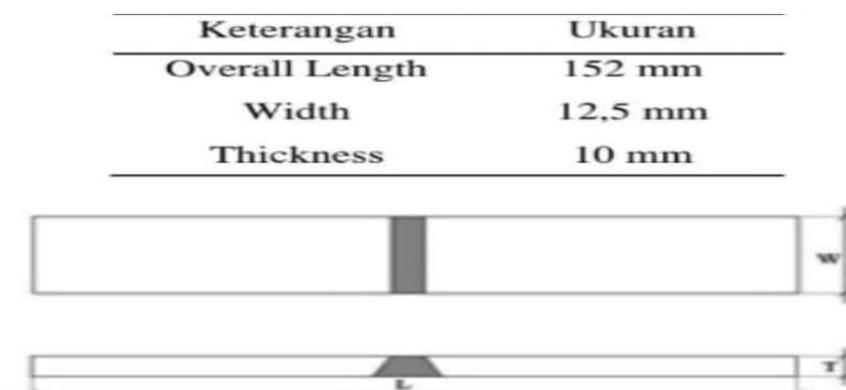
- i. Alat Uji *Bending*
  - j. Alat Uji Tari
2. Bahan yang digunakan
    - a. Kawat Las *Flux core* 81 ( Cigweld)
    - b. Material Baja ASTM A36/HB 111,HB 225 dan HB 400
    - c. Material *Tumbler* Ex 3600
  3. Desain Spesimen Uji kekerasan ( ASTM E 10 )



**Gambar 3. 1 Spesimen Uji kekerasan**

Sumber : M. Ihsan Nugroho, 2024 (Dokumen Pribadi)

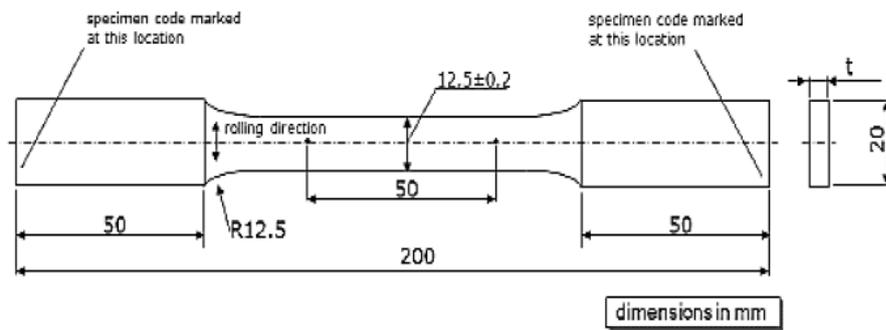
4. Desain Spesimen Uji *Bending* ( ASTM E290)



**Gambar 3. 2 Spesimen Uji *bending***

Sumber : M. Ihsan Nugroho, 2024 (Dokumen Pribadi)

## 5. Desain Spesimen Uji Tarik ( ASTM E8 )

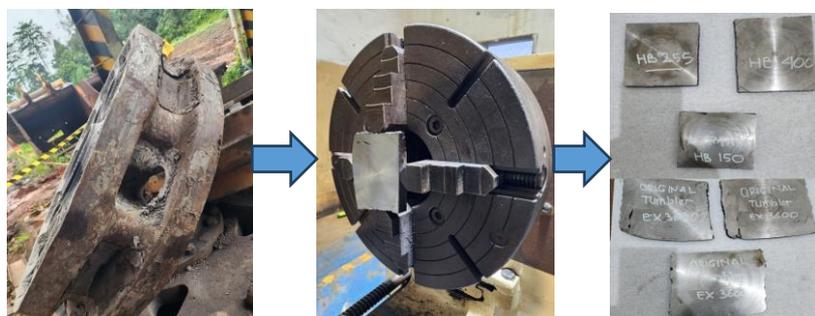


**Gambar 3. 3 Spesimen Uji Tarik**  
 Sumber : <http://www.researchgate.net/figure>

## 6. Pembuatan Spesimen

### a. Pemotongan Material

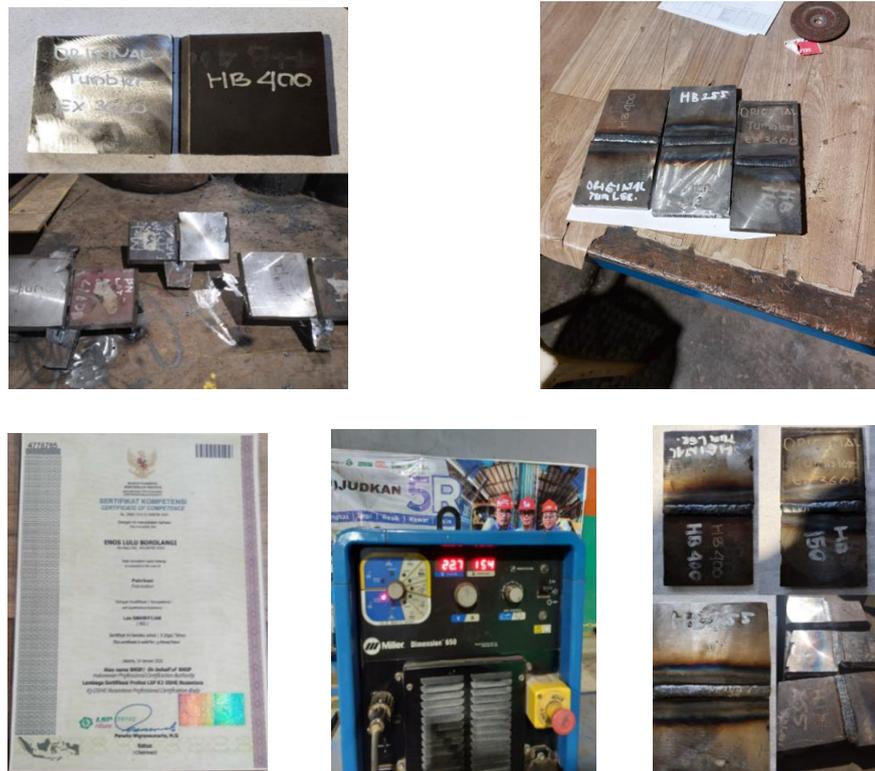
Proses Pemotongan Material dilakukan oleh welder yang sudah mempunyai lisensi proses Fabrikasi, pengambilan sampling, perapihan sesuai ukuran dengan mesin Bubut dan Frais.



**Gambar 3. 4 Pemotongan spesimen *tumbler* dan Material HB**  
 Sumber : M. Ihsan Nugroho, 2024 (Dokumen Pribadi)

## b. Pengelasan Material Spesimen

Pengelasan material dilakukan di area *Workshop Fabrikasi* PT BUMA Lati Berau Kaltim, dengan metode Pengelasan Full Antara specimen *Tumbler* dengan variasi Material ASTM A36/HB 111, HB 225 dan HB 400. Pengelasan dilakukan dengan 3 layer (Rootpass, fillpass dan Capping, serta memastikan setiap perubahan layer dengan menyesuaikan Ampere dan Voltase yang sama dan juga waktu pengelasan pada setiap tahapan layer). Sambungan pengelasan dengan *butt Joint* dan kampuh *bevel groove*. Metode pengelasan *Down hand Position*. Proses pengelasan dilakukan oleh Welder dengan sertifikat kompetensi Las FCAW (6G) dari BNSP.



**Gambar 3. 5 Proses pengelasan Spesimen**  
 Sumber : M. Ihsan Nugroho, 2024 (Dokumen Pribadi)

### c. Pemotongan bentuk Spesimen

Proses pemotongan dan pembentukan spesimen dilakukan dengan mesin bubut dan mesin frais.



**Gambar 3. 6 Proses pemotongan Spesimen**  
Sumber : M. Ihsan Nugroho, 2024 (Dokumen Pribadi)

### d. Hasil Spesimen

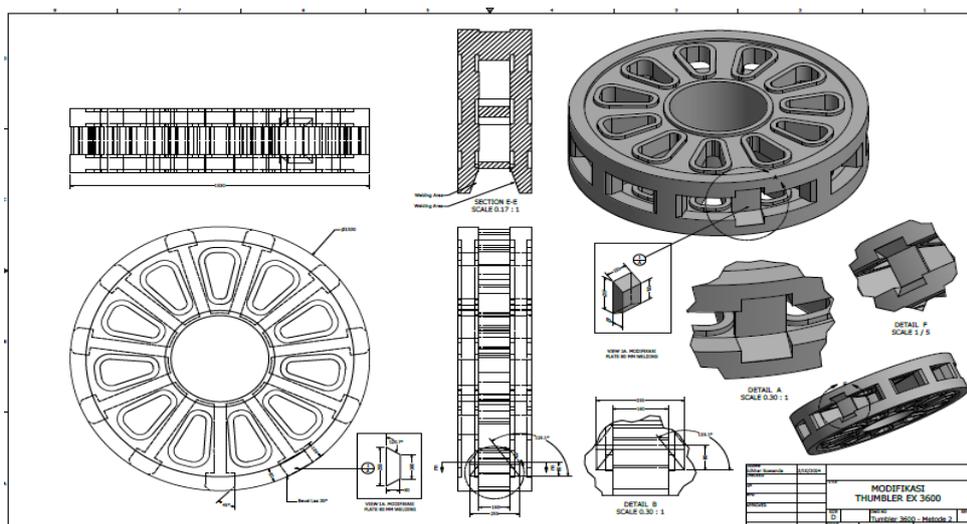
Hasil spesimen di sesuaikan dengan mesin uji dengan standart ASTM dan di kirim ke Laboratorium Bahan Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.



**Gambar 3. 7 Hasil Spesimen**

Sumber : M. Ihsan Nugroho, 2024 (Dokumen Pribadi)

## 7. Gambar dan desain Alat



**Gambar 3. 8 Desain dan Tumbler yang dilakukan Repair**

Sumber : M. Ihsan Nugroho, 2024 (Dokumen Pribadi)

Instrumen penelitian ini berfokus pada penggunaan pelat baja dengan tingkat kekerasan Brinell yang bervariasi, yaitu ASTM A36/HB 111, HB 255, dan HB 400, untuk mengevaluasi efektivitas pengelasan menggunakan *flux core* 81 T. Material ini dipilih karena mencerminkan kondisi nyata yang dihadapi dalam perbaikan *tumbler* pada *Excavator* Hitachi 3600. Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi mesin pengelasan FCAW yang telah dikalibrasi, alat uji kekerasan Brinell, mesin uji tarik yang mengikuti standar ASTM E8M, dan mesin uji *bending* sesuai standar ASTM E290, untuk mengukur kekuatan mekanis, fleksibilitas, dan ductility sambungan las. Pengukuran dimensi sampel dilakukan dengan menggunakan caliper dan mikrometer, dan dokumentasi visual dilakukan dengan kamera untuk memastikan akurasi hasil pengujian.

Desain sampel untuk pengujian disusun mengikuti standar ASTM yang relevan dengan kualifikasi prosedur pengelasan logam, dengan pembuatan gambar teknis sebelum pelaksanaan untuk menjamin integritas desain. Proses penelitian akan mengikuti protokol yang ketat mulai dari persiapan sampel, pengelasan, pengukuran awal, hingga pengujian dan analisis data. Sampel material diambil secara purposive dari populasi pelat baja yang biasa digunakan dalam industri untuk perbaikan *tumbler*, dengan tujuan untuk memastikan relevansi dengan tujuan penelitian dan mencapai signifikansi statistik dalam hasil yang diperoleh.

#### D. Variabel Penelitian

Variabel yang biasa di gunakan dalam suatu penelitian terdiri dari Variabel Bebas (*Independent Variable*), Variabel Terikat (*Dependent Variable*) dan Variabel Kontrol (Control Variabel).

Variabel Bebas adalah penyebab terjadinya perubahan pada variable lain dengan kata lain perubahan yang terjadi pada variabel ini menyebabkan perubahan pada variabel lain.

Variabel terikat adalah Variabel yang keberadaannya di akibatkan karena adanya variabel bebas. dinamakan sebagai variabel terikat karena secara kondisi dan variasinya terikat serta di pengaruhi oleh variasi variasi lainnya dalam kontek ini yang termasuk Variabel Terikat ( Pengujian Tarik, Pengujian *Bending*, Pengujian kekerasan ).

Variabel Kontrol adalah merupakan jenis variabel yang di batasi dan di kendalikan pengaruhnya sehingga tidak berpengaruh pada gejala yang sedang di lakukan penelitian dalam case ini penggunaan variasi material ASTM A36/ HB 111, HB 225 dan HB 400, serta penggunaan kawat las *Flux core 81 T*

No.	Variabel	Jenis
1	Variasi Kuat Arus dan Voltase saat Root Pass (22,8V,144A), Fill Pass (25,1V,148A) dan Capping (27,8V,154A) setiap set sampling	Independent/Bebas
2	Waktu Pengelasan Root Pass (1menit), Fill Pass (30 detik) dan Capping (30 detik) setiap set Sample.	Independent/Bebas
3	Kekuatan tarik hasil pengelasan	Dependen/Terikat
4	Uji <i>bending</i> hasil pengelasan	Dependen/Terikat
5	Kekerasan hasil pengelasan	Dependen/Terikat

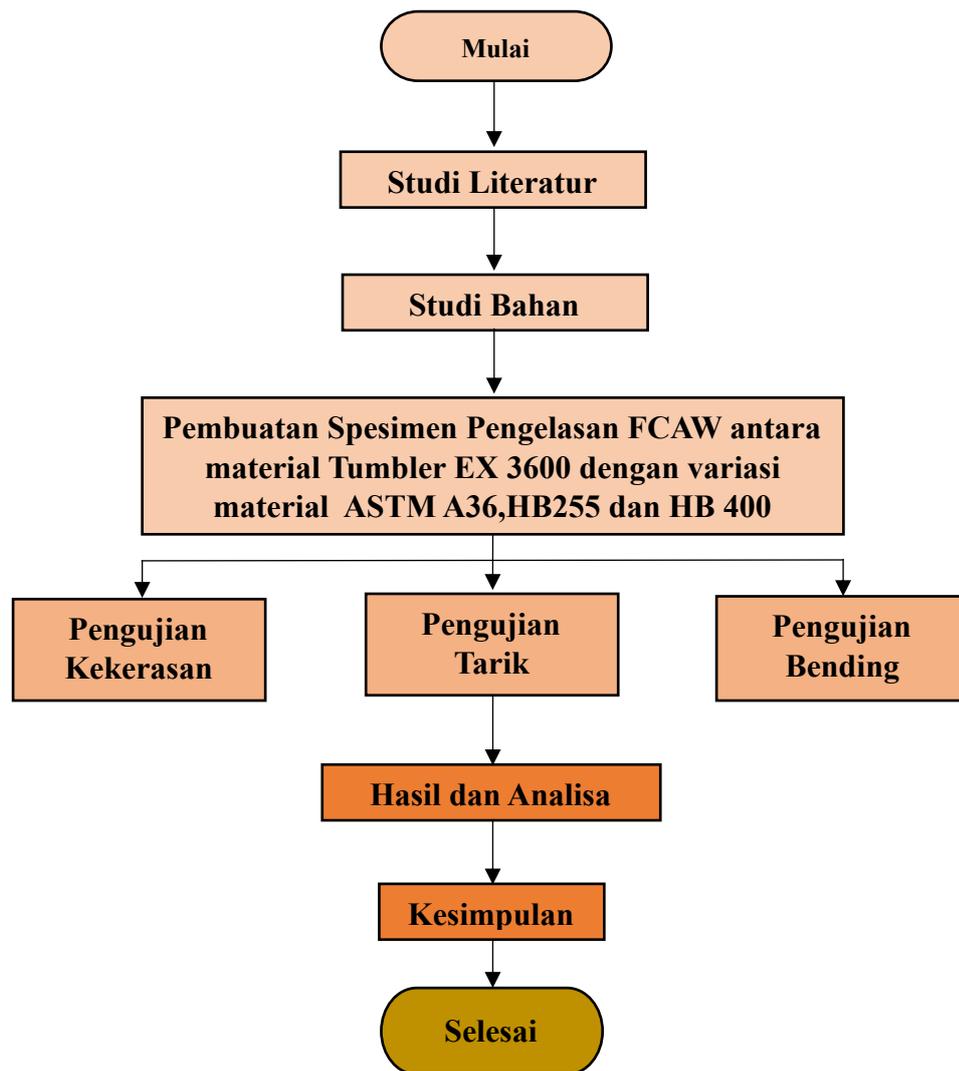
6	Penggunaan <i>flux core</i> 81 T	Kontrol
7	Plate dengan kekerasan berbeda (ASTM A36/HB 111, HB 255, HB 400)	Kontrol

**Tabel 3. 1** Variabel Penelitian

### E. Diagram Alir Penelitian

Pada tahap pertama, penelitian akan fokus pada pengukuran kekerasan hasil pengelasan dengan menggunakan *flux core* 81T pada ketiga jenis plate tersebut. Pengukuran kekerasan akan dilakukan menggunakan metode Brinell, tergantung pada kekerasan material yang diharapkan, untuk mendapatkan gambaran yang akurat mengenai pengaruh *flux core* 81 T terhadap kekerasan hasil pengelasan.

Tahap kedua akan menguji apakah terdapat perbedaan signifikan dalam Uji *Bending*, hasil pengelasan antara plate dengan kekerasan yang berbeda. Ini akan melibatkan pengelasan serupa pada ketiga jenis plate dan pengukuran Uji *bending* hasil pengelasan, dengan membandingkan hasil antara masing-masing plate, tahap terakhir akan menilai pengaruh penggunaan *flux core* 81 T terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan. Eksperimen ini akan menggunakan simulasi penggunaan plate dengan kekerasan yang berbeda, dan kekuatan tarik akan diukur menggunakan mesin uji tarik. Data yang diperoleh akan dianalisis untuk menentukan hubungan antara jenis plate dan penggunaan *flux core* 81 T dengan kekuatan tarik hasil pengelasan.



**Gambar 3.9 Diagram Alur Penelitian**

Seluruh eksperimen akan didokumentasikan secara rinci, termasuk parameter pengelasan yang digunakan, prosedur pengujian, dan analisis data. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru mengenai pemilihan material pengelasan dan strategi perbaikan untuk meningkatkan keandalan dan durabilitas *repair pad* Tumbler pada *Excavator* Hitachi 3600. Hasil penelitian ini akan sangat berguna bagi industri konstruksi dan pertambangan dalam mengoptimalkan proses perbaikan dan pemeliharaan alat berat (Lin & Chang, 2019).

## F. Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini melibatkan penggunaan metode pengujian yang terstruktur untuk mengukur kekerasan, kekuatan tarik, dan tegangan *bending* dari sampel hasil pengelasan yang menggunakan *flux core* 81 T pada *repair pad tumbler Excavator Hitachi 3600*. Proses pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin, Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Laboratorium ini dipilih karena memiliki fasilitas dan peralatan yang sesuai standar untuk melakukan pengujian mekanik material secara presisi.

Proses pengumpulan data dimulai dengan pengukuran kekerasan setiap sampel lasan menggunakan metode pengujian kekerasan Brinell. Alat ukur kekerasan Brinell di laboratorium ini digunakan untuk menerapkan beban pada indenter yang kemudian ditekan ke dalam sampel lasan. Ukuran indentasi yang dihasilkan diukur, dan nilai kekerasan dihitung berdasarkan formula yang sesuai dengan metode Brinell.

Selanjutnya, pengukuran kekuatan tarik dijalankan menggunakan mesin uji tarik yang tersedia di laboratorium. Sampel lasan ditempatkan pada mesin, dan beban diterapkan secara bertahap hingga sampel mengalami kegagalan. Kekuatan tarik dihitung berdasarkan beban maksimum yang dapat ditahan sampel sebelum pecah, memberikan insight tentang kemampuan material lasan untuk menahan beban tarik. Pengujian *bending* juga dilakukan di laboratorium ini untuk menilai fleksibilitas material hasil pengelasan. Semua hasil pengujian, baik untuk kekerasan, kekuatan tarik, maupun *bending*, dicatat dengan detail dalam bentuk digital atau kertas.

Data yang terkumpul mencakup nilai kekerasan, kekuatan tarik maksimum, tegangan *bending*, serta kondisi spesifik pengujian, seperti jenis plate material yang digunakan, parameter pengelasan, dan kondisi lingkungan selama pengujian. Penggunaan sistem pencatatan yang terorganisir memungkinkan peneliti untuk melacak dan menganalisis hasil pengujian secara efisien, memastikan integritas data, dan memudahkan dalam melakukan analisis komparatif antar sampel. Teknik pencatatan hasil pengujian juga mencakup dokumentasi visual, seperti foto atau video sampel sebelum dan sesudah pengujian, yang dapat membantu dalam analisis lebih lanjut mengenai mekanisme kegagalan atau karakteristik spesifik dari sambungan las. Pengumpulan data yang komprehensif dan terstruktur ini krusial untuk mendukung analisis data dan pembahasan hasil penelitian, memungkinkan peneliti untuk menarik kesimpulan yang valid dan memberikan rekomendasi yang berbasis bukti.

## **G. Metode Analisis Data**

Metode analisis data dalam penelitian ini melibatkan tiga jenis pengujian utama: uji *bending*, uji tarik, dan uji kekerasan. Masing-masing pengujian ini memiliki metodologi dan rumus spesifik untuk menghitung parameter yang diinginkan.

### **1. Uji Tarik**

Uji tarik menilai kekuatan maksimum material ketika ditarik hingga patah. Parameter yang dihasilkan dari pengujian ini antara lain tegangan

luluh, kekuatan tarik maksimum, dan elongasi. Rumus yang umum digunakan dalam analisis data uji tarik adalah:

$$\sigma = \frac{\Delta L}{L_o} \times 100\%$$

## 2. Uji *Bending*

Uji *bending* digunakan untuk menilai ketahanan material terhadap deformasi plastik di bawah beban lentur. Dalam pengujian ini, sampel material dibebani hingga terjadi lengkungan atau pembengkokan hingga batas spesifik. Metode analisis data ini biasanya mencatat sudut atau radius lengkungan pada saat kegagalan atau retak terjadi.

## 3. Uji Kekerasan

Uji kekerasan, seperti uji kekerasan Brinell, digunakan untuk menentukan seberapa resisten material terhadap penetrasi.

$$F/A$$

Ketiga uji di atas memberikan informasi yang berbeda tentang sifat material dan kinerja sambungan las. Uji *bending* memberikan *insight* tentang fleksibilitas dan daya tahan material terhadap beban lentur, uji tarik mengungkapkan kekuatan dan ductilitas, dan uji kekerasan menunjukkan resistensi permukaan material terhadap indentasi dan abrasi. Data yang diperoleh dari ketiga pengujian ini kemudian akan dianalisis untuk menentukan kelayakan dan kualitas proses pengelasan yang digunakan dalam penelitian.