

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aluminium

Aluminium adalah logam *non-ferrous* yang paling banyak digunakan di dunia. Aluminium adalah logam ringan dengan berat jenis rendah, konduktivitas panas dan listrik yang baik, serta ketahanan korosi yang tinggi. Aluminium merupakan unsur yang paling banyak di alam setelah oksigen yaitu sekitar 7,45%. Aluminium memiliki nomor atom 13 dan berada di grup 13 tabel periodik memiliki berat atom sekitar 26,98 gram/mol dan massa jenis sekitar 2,7 gram/cm³. Aluminium memiliki titik leleh sekitar 660°C (1220°F) dan titik didih sekitar 2467°C (4473°F). Logam ini memiliki kekuatan yang baik meskipun memiliki berat yang rendah. Kekuatan aluminium dapat ditingkatkan melalui pengerasan dengan pemanasan atau dengan penggunaan paduan aluminium. Aluminium dan aluminium paduan merupakan logam yang cukup banyak digunakan di dunia industri setelah penggunaan baja dan besi cor. Aluminium merupakan logam yang ringan dan memiliki ketahanan korosi yang baik, hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat lainnya. Umumnya aluminium dicampur dengan logam lainnya sehingga membentuk aluminium paduan. Material ini dimanfaatkan bukan saja untuk peralatan rumah tangga, tetapi juga dipakai untuk keperluan industri, konstruksi, dan lain sebagainya [10].

Aluminium memiliki beberapa kelebihan dalam pengelasan *rotary friction welding*. Aluminium memiliki konduktivitas termal yang tinggi, memungkinkan

penyebaran panas yang merata selama proses pengelasan. Hal ini mengurangi risiko deformasi atau distorsi pada bahan kerja. Aluminium adalah logam ringan, ia memiliki kekuatan yang baik setelah menjalani proses pengelasan. Pengelasan *rotary friction welding* dapat membentuk sambungan yang kuat, sehingga menghasilkan sambungan yang tahan terhadap beban mekanis. Aluminium memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi berkat lapisan oksida alami yang terbentuk di permukaannya. Ini menjadikannya pilihan yang cocok untuk aplikasi yang menghadapi lingkungan yang keras atau korosif. Aluminium memiliki kompatibilitas yang baik dengan berbagai jenis logam dan bahan lain, memungkinkan pengelasan *rotary friction welding* antara aluminium dan logam lain. Ini memperluas pilihan dan fleksibilitas dalam penggunaan aluminium dalam berbagai kombinasi bahan. Pengelasan *rotary friction welding* dengan aluminium sering dikaitkan dengan efisiensi produksi yang tinggi karena sambungan yang kuat dapat terbentuk dalam waktu singkat [11].

2.1.1 Aluminium murni

Aluminium murni mengacu pada aluminium yang memiliki kemurnian tinggi, yaitu logam aluminium yang hampir bebas dari unsur-unsur lain. Aluminium murni umumnya memiliki kadar aluminium lebih dari 99%. yang didapatkan dari bauksit dengan cara elektrolisa mempunyai kemurnian antara 99% - 99,99%. Aluminium murni mempunyai sifat dasar yang lunak, tahan korosi, penghantar panas dan listrik yang baik. Aluminium 99% tanpa tambahan logam paduan apapun dan dicetak dalam keadaan biasa, hanya memiliki kekuatan tensil sebesar 90 MPa, terlalu

lunak untuk penggunaan yang luas sehingga sering kali aluminium dipadukan dengan logam lain [12].

Aluminium murni mempunyai sifat dasar yang lunak, tahan korosi, penghantar panas dan listrik yang baik. Aluminium ringan berat jenisnya hanya $2,7 \text{ g/cm}^3$ dibandingkan dengan baja yang memiliki berat jenis $7,8 \text{ g/cm}^3$ dan tembaga yang memiliki berat jenis $8,8 \text{ g/cm}^3$. Aluminium memiliki konduktivitas listrik sekitar $3,5 \times 10^7 \text{ S/m}$. Aluminium memiliki konduktivitas panas tinggi, yaitu $2,09 \text{ J/cm.s.K}$ dibandingkan dengan baja yang hanya memiliki konduktivitas panas $0,67 \text{ J/cm.s.K}$. Aluminium memiliki titik lebur $933,47 \text{ K}$, titik didih 2792 K , kalor jenis (25°C) $24,2 \text{ J/mol K}$, resistansi listrik (20°C) $28,2 \text{ ohm}$, konduktivitas termal (300 K) 237 w/m K , pemuaian termal (25°C) $23,1 \text{ } \mu\text{m/m K}$, modulus young 70 GPa , modulus geser 26 GPa , *yield strength* 11 MPa , *poissons ratio* $0,35$, kekuatan lentur 100 MPa , kekerasan skala *Vickers* 40 HVN . Aluminium merupakan logam yang sangat reaktif terhadap oksigen di udara dan air serta hasil dari reaksinya membentuk suatu senyawa yang sangat stabil, sangat keras dan lapisan pelindung transparan yang sangat kuat yang disebut aluminium oksida (Al_2O_3), sehingga membuat aluminium tahan terhadap korosi, tahan terhadap asam tetapi kurang tahan terhadap alkali kuat [12].

2.1.2 Aluminium paduan

Paduan aluminium mengacu pada campuran aluminium dengan satu atau lebih unsur logam lainnya. Paduan ini dibuat untuk memperbaiki sifat-sifat aluminium murni dan memberikan karakteristik tertentu yang

diinginkan dalam berbagai aplikasi. Penambahan unsur logam lain pada aluminium dapat mengubah sifat-sifat mekanik, termal, dan kimianya. Beberapa contoh unsur logam yang sering ditambahkan dalam paduan aluminium meliputi tembaga (Cu), silikon (Si), magnesium (Mg), mangan (Mn), seng (Zn), nikel (Ni), dan banyak lagi. Setiap unsur logam ini memberikan kontribusi yang berbeda dalam meningkatkan kekuatan, kekerasan, ketahanan korosi, atau sifat lainnya pada aluminium. Berdasarkan unsur paduannya, dalam hal ini aluminium dibagi menjadi beberapa bagian yaitu [13].

1. Tembaga(Cu), menaikkan kekuatan dan kekerasan, namun menurunkan elongasi (pertambahan panjang pada saat ditarik). Kandungan Cu dalam aluminium yang paling optimal adalah antara 4-6%.
2. Seng (Zn), meningkatkan kekuatan tarik (tensile strength) aluminium
3. Mangan (Mn), menaikkan kekuatan dalam temperatur tinggi.
4. Magnesium (Mg), menaikkan kekuatan aluminium dan menurunkan nilai *ductility*-nya. Ketahanan korosi dan *weldability* juga baik.
5. Silikon (Si), menyebabkan paduan aluminium tersebut bisa diperlakukan panas untuk menaikkan kekerasannya.
6. Lithium (Li), ditambahkan untuk memperbaiki sifat tahan oksidasinya.

Pembagian paduan pada *aluminum alloy* adalah dengan menggunakan 4 digit kode nomor. Aluminium diklasifikasikan menjadi dua bagian yaitu satu untuk paduan aluminium tempa (*wrought aluminum*) dan lainnya untuk aluminium tuang (*cast aluminum*).

Tabel 2.1 Jenis Paduan Aluminium [13].

<i>Alloy Group</i>	<i>Wrought Code</i>	<i>Cast Code</i>
<i>Aluminium, 99.0% or higher purity</i>	1XXX	1XX.X
<i>Aluminium alloys, by major element(s):</i>		
<i>Copper</i>	2XXX	2XX.X
<i>Manganese</i>	3XXX	3XX.X
<i>Silicon + Copper and or magnesium</i>		
<i>Silicon</i>	4XXX	4XX.X
<i>Magnesium</i>	5XXX	5XX.X
<i>Magnesium and Silicon</i>	6XXX	
<i>Zinc</i>	7XXX	7XX.X
<i>Tin</i>		8XX.X
<i>Other</i>	8XXX	9XXX.X

Contoh paduan aluminium yang umum digunakan termasuk [13]

1. Paduan Aluminium Seri 1xxx mengandung aluminium murni dengan kadar kemurnian tinggi dan sedikit atau tanpa penambahan unsur lain. Memiliki konduktivitas termal dan listrik yang baik, serta ketahanan korosi yang tinggi. Paduan 1100 adalah contoh umum dari paduan seri ini.
2. Paduan Aluminium Seri 2xxx mengandung tembaga sebagai unsur utama dengan penambahan elemen paduan seperti magnesium. Karakteristik utama dari paduan seri 2xxx adalah kekuatan yang tinggi, tetapi memiliki ketahanan korosi yang rendah dibandingkan dengan paduan lainnya. Paduan utama dalam seri ini adalah paduan

aluminium 2024 yang sering digunakan dalam aplikasi pesawat terbang dan struktur pesawat lainnya. Paduan ini memiliki kekuatan yang sangat tinggi dan tahan terhadap kelelahan, membuatnya cocok untuk aplikasi yang membutuhkan sifat mekanis yang kuat.

3. Paduan Aluminium Seri 3xxx mengandung aluminium dengan penambahan sejumlah kecil mangan. Memiliki ketahanan korosi yang baik dan mudah dikerjakan secara dingin. Paduan 3003 dan 3004 adalah contoh yang umum dalam seri ini.
4. Paduan Aluminium Seri 4xxx mengandung silikon sebagai unsur utama dengan penambahan magnesium. Paduan utama dalam seri ini adalah paduan aluminium 4043 dan 4343. Paduan ini digunakan terutama dalam pengelasan karena memiliki sifat aliran yang baik dan kemampuan untuk mengikat logam basis dengan baik. Mereka digunakan dalam pengelasan aluminium dengan logam lain, seperti baja, untuk membentuk sambungan yang kuat.
5. Paduan Aluminium Seri 5xxx mengandung magnesium sebagai unsur utama dengan penambahan sejumlah kecil unsur lain seperti mangan. Karakteristik utama dari paduan seri 5xxx adalah kekuatan yang moderat, ketahanan korosi yang tinggi, dan kemampuan pengelasan yang baik. Paduan utama dalam seri ini adalah paduan aluminium 5052, 5083, dan 5754. Paduan ini sering digunakan dalam industri maritim, otomotif, dan konstruksi kapal karena kekuatan, ketahanan korosi, dan kemampuan pengelasannya.

6. Paduan Aluminium Seri 6xxx mengandung aluminium dengan penambahan silikon dan magnesium. Mereka memiliki kekuatan yang baik, serta kemampuan membentuk dan dilas dengan baik. Paduan 6061 dan 6063 adalah contoh yang umum dalam seri ini.
7. Paduan Aluminium Seri 7xxx mengandung aluminium dengan penambahan unsur logam seperti seng, tembaga, dan magnesium. Memiliki kekuatan dan kekerasan yang tinggi, serta ketahanan korosi yang baik. Paduan 7075 adalah contoh yang umum dalam seri ini.

2.1.3 Aluminium 6063

Aluminium 6063 adalah paduan aluminium dari seri 6xxx yang banyak digunakan dalam aplikasi konstruksi, terutama untuk profil aluminium seperti rangka jendela, pintu, dan sistem pemagaran. Aluminium batang tipe 6063 memiliki kekuatan sedang, yang menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi di mana kekuatan struktural yang memadai diperlukan, tetapi tidak memerlukan kekuatan yang sangat tinggi. Paduan ini dapat memberikan kekuatan yang cukup untuk kebutuhan konstruksi dan arsitektur. Aluminium 6063 memiliki permukaan yang baik dan halus. Ini memungkinkan hasil akhir yang estetik dan memudahkan proses anodisasi. Permukaan yang baik juga memudahkan pemasangan, penyambungan, dan penggunaan paduan ini dalam konstruksi yang rumit. Aluminium 6063 memiliki ketahanan korosi yang tinggi, terutama karena adanya lapisan

oksida alami yang membentuk permukaan aluminium yang terpapar udara. Ini membuatnya cocok untuk digunakan dalam lingkungan yang menghadapi kelembaban atau kondisi korosif. Aluminium 6063 memiliki sifat yang baik untuk pengelasan. Ini memungkinkan penggunaan metode pengelasan seperti pengelasan untuk menggabungkan komponen dalam konstruksi atau arsitektur. Sifat pengelasan yang baik juga memudahkan proses produksi dan perakitan. Paduan aluminium 6063 mudah dianodisasi, yang berarti dapat membentuk lapisan oksida yang terkontrol dengan baik pada permukaannya. Ini memungkinkan pemberian lapisan perlindungan, perubahan warna, atau peningkatan estetika pada produk aluminium 6063. Aluminium 6063 umumnya tersedia dalam kondisi T6, yang mengalami proses penuaan (*aging*) setelah ekstrusi untuk meningkatkan kekuatan dan sifat mekaniknya. Komposisi kimia dari aluminium tipe 6063 dapat dilihat pada Tabel 2.2 di bawah ini .

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Aluminium 6063 [14].

Unsur	Komposisi
Tembaga	0,10%
Besi	0,35%
Silika	0,20-0,60%
Mangan	0,10%
Magnesium	0,45-0,90%
Zinc	0,10%
Kromium	0,10%
Boron	0,06%
Aluminium	97,5%

Sedangkan sifat mekanik yang dimiliki dari Aluminium 6063, dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat Mekanik Aluminium 6063 [14].

Sifat Mekanik	Nilai
Densitas pada 20°C	2,7 g/m ³
Konduktivitas minimal pada 20°C	200 W/m.K
Koefisien resistansi pada 20°C	0,33 x 10 ⁻⁶ Ω.m
Kekerasan <i>Brinnell</i>	73 HB
Kekerasan <i>Rockwell</i>	43 HRB
<i>Tensile strength</i>	241 MPa
<i>Yield strength</i>	214 MPa
Modulus Elastisitas	68,9 GPa
<i>Melting point</i>	654°C
<i>Thermal Expansion</i>	23,5 x 10 ⁻⁶ /K

Penggunaan aluminium 6063 dalam metode *friction welding* memiliki sejumlah kelebihan sifat mekanik yang signifikan. Bahan ini menawarkan kekuatan lentur yang baik, memungkinkannya untuk menahan beban lentur tanpa mengalami deformasi yang berarti. Kekerasan moderatnya memungkinkannya digunakan dalam berbagai aplikasi tanpa menjadi terlalu rapuh atau terlalu lunak, sehingga memberikan ketahanan terhadap abrasi dan deformasi. Kekuatan tarik yang baik, terutama dengan perlakuan panas yang sesuai, memungkinkan aluminium 6063 untuk menahan beban tarik dengan kegagalan minimal. Kemampuan untuk mengontrol struktur mikro melalui perlakuan panas dan pendinginan memungkinkan pencapaian sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi, termasuk peningkatan kekuatan dan kekerasan.

2.2 Tembaga

Tembaga adalah logam mulia yang memiliki nomor atom 29 dalam tabel periodik. Tembaga ditemukan dalam keadaan murni atau sebagai komponen dalam berbagai bijih tembaga. Tembaga memiliki konduktivitas termal dan listrik yang sangat baik, serta daya tahan korosi yang tinggi. Sifat-sifat ini membuatnya menjadi bahan yang sangat berguna dalam berbagai aplikasi, terutama sebagai penghantar listrik dalam kabel dan peralatan listrik. Tembaga juga memiliki sifat-sifat mekanik yang baik, termasuk kekuatan, keuletan, dan kemampuan untuk diubah bentuk (*ductility*). Hal ini memungkinkan tembaga untuk digunakan dalam pembuatan berbagai produk, seperti pipa, kabel, peralatan rumah tangga, peralatan industri, dan komponen elektronik [15]. Sifat mekanik tembaga dapat dilihat pada Tabel 2.4 dibawah ini [16].

Tabel 2.4 Sifat Mekanik Tembaga [16].

Simbol Kimia	Cu
Nomor Atom	29
Berat Atom	63,54
Densitas	8,96 g/m ³
Titik Lebur	1356 K
Panas Spesifik cp (293K)	0,383 kJ kg ⁻³ K ⁻³
Konduktivitas Termal 20°C	394 W/m.K
Koefisien Ekspansi linear	16,5 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹
<i>Tensile Strength</i>	250 MPa
<i>Yield Strength</i>	220 MPa
Elastisitas Modulus <i>Young</i>	110 GPa
Struktur Kristal	<i>Face Centered Cubic (FCC)</i>

Tembaga memiliki konduktivitas listrik yang sangat baik, menjadikannya salah satu logam terbaik dalam hal penghantar listrik. Sifat ini membuat tembaga menjadi pilihan utama untuk kabel, kawat, dan komponen elektronik yang membutuhkan aliran listrik yang efisien [17]. Selain konduktivitas listrik, tembaga juga memiliki konduktivitas termal yang tinggi. Ini menjadikannya bahan yang baik untuk aplikasi yang membutuhkan transfer panas yang efisien, seperti dalam sistem pemanasan, pendinginan, dan peralatan industri [18]. Tembaga memiliki ketahanan korosi yang baik dalam berbagai lingkungan. Permukaannya membentuk lapisan oksida alami yang melindungi logam dari korosi. Hal ini membuat tembaga cocok untuk digunakan dalam aplikasi air, seperti pipa air dan sistem perpipaan [19]. Meskipun tembaga bukanlah logam dengan kekuatan yang sangat tinggi, ia memiliki kekuatan yang memadai untuk banyak aplikasi. Selain itu, tembaga juga sangat elastis dan memiliki keuletan yang tinggi, sehingga dapat diubah bentuk dan ditempa dengan mudah [20]. Tembaga memiliki penampilan yang menarik dengan warna kemerah-merahan yang khas. Oleh karena itu, tembaga sering digunakan dalam aplikasi arsitektur dan dekoratif untuk memberikan sentuhan estetika yang menarik [21].

Dalam produksi dan konsumsi, tembaga dan paduan menjadi salah satu kelompok logam komersial yang sering digunakan selain baja atau besi, dan aluminium. Tembaga banyak digunakan karena konduktivitas termal dan listrik yang baik, ketahanan korosi yang luar biasa, kemudahan fabrikasi, ketahanan lelah dan kekuatan yang baik. Tembaga umumnya *nonmagnetic* sehingga dapat dengan mudah disolder dan di *brazing*, dan banyak tembaga dan paduan tembaga dapat

dilas dengan berbagai metode gas, busur, dan resistansi. Paduan standar yang memiliki warna tertentu sudah tersedia untuk bagian dekoratif. Paduan tembaga dapat dipoles dan digosok hingga hampir semua tekstur dan kilau yang diinginkan. Paduan tembaga dapat dilapisi, dilapisi dengan bahan organik, atau diwarnai secara kimiawi untuk lebih memperluas variasi hasil akhir yang tersedia [16].

Tembaga adalah logam lunak yang berwarna coklat orange yang membuatnya populer sebagai logam pelapis yang bersifat dekoratif. Tembaga mempunyai sifat penghantar listrik dan panas yang baik dengan titik didih 1085°C. Pada titik didih tersebut tembaga sering dipilih sebagai bahan yang cocok untuk pembuatan kabel listrik, dan juga tembaga dapat disambungkan sehingga cocok untuk pembuatan pipa untuk *heating systems*. Tembaga termasuk pada logam yang jarang ditemui di alam, hanya sekitar 0,1% yang dapat ditemukan di kerak bumi [22]. Tembaga dan paduannya sering sekali digunakan pada abanyak aplikasi industri, seperti pada bidang kelautan, energi, transportasi dan lain-lain. Tembaga murni dapat digunakan untuk keperluan yang sangat luas, seperti kontak listrik, kabel dan kawat, dan berbagai macam aplikasi lain yang sering kita temukan untuk mengalirkan arus listrik [23].

.

2.3 Pengelasan

Pengelasan menurut DIN (*Deutsche Industrie Norman*) adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilakukan dalam keadaan atau cari. Pengelasan adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas [24]. Mengelas adalah suatu aktifitas

menyambung dua bagian benda atau lebih dengan cara memanaskan atau menekan atau gabungan dari keduanya sehingga menyebabkan menyatu seperti benda utuh. Penyambungan dapat menggunakan atau tanpa bahan tambahan (*filler metal*) yang sama atau berbeda titik cair maupun strukturnya. Pengelasan dapat didefinisikan menjadi proses penyambungan dua buah logam sampai titik rekristalisasi logam, dengan atau tanpa menggunakan bahan tambah dan menggunakan energi panas sebagai pencair bahan yang akan dilas. Pengelasan dapat diartikan sebagai ikatan yang tetap dari benda atau logam yang dipanaskan. Mengelas tidak hanya untuk memanaskan dua bagian benda sampai mencair dan membiarkan membeku kembali, tetapi mengelas juga untuk membuat lasan yang utuh dengan cara memberikan bahan tambah atau elektroda pada waktu dipanaskan sehingga mempunyai kekuatan yang dikehendaki. Kekuatan pada sambungan las dipengaruhi oleh berbagai faktor, yaitu prosedur pengelasan, bahan, elektroda, dan jenis kampuh yang digunakan [25].

Pengelasan didefinisikan oleh AWS (*American Welding Society*) sebagai proses penggabungan terlokalisasi pada logam atau non logam yang dihasilkan baik dengan menggunakan pemanasan bahan dengan temperatur pengelasan yang diperlukan baik dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau menggunakan bahan pengisi [1].

Berdasarkan cara kerjanya proses pengelasan dibagi menjadi 3 kelompok utama, yaitu pengelasan cair (*fusion welding*), pengelasan tekan (*solid state welding*), dan *soldering/brazing*. Pengelasan cair adalah cara pengelasan dimana proses penyambungan dipanaskan sampai mencair dengan suatu sumber panas.

Pengelasan tekan adalah teknik pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan diberi tekanan tempa hingga dapat menyatu. *Soldering/brazing* adalah metode pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair rendah [26]. Pada proses pengelasan diperlukan suatu sumber panas yang dapat mencairkan atau memanaskan dan menekan kedua bagian logam yang ingin disambungkan. Sumber panas pada proses pengelasan didasarkan pada penggunaan energi listrik, energi bahan bakar gas, dan energi mekanik. Umumnya teknik pengelasan yang banyak digunakan pada masa ini adalah pengelasan cair dengan menggunakan bahan bakar gas [27].

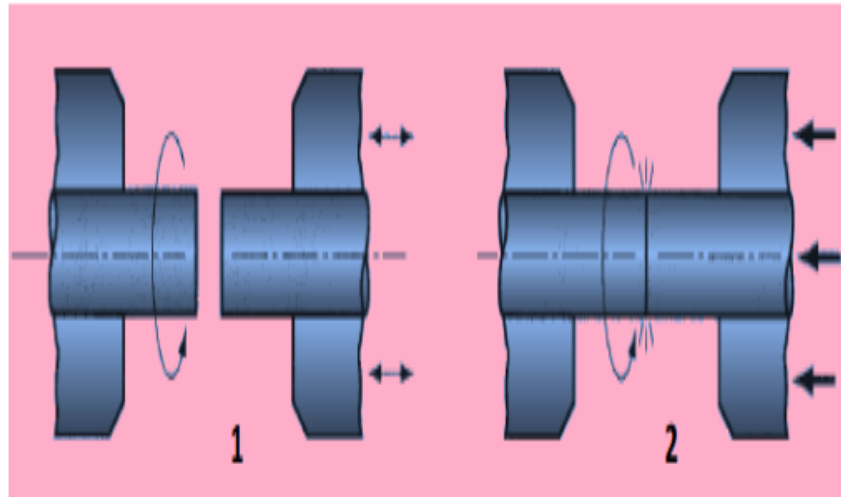
Walaupun pengelasan busur listrik mudah untuk diaplikasikan akan tetapi pengelasan busur listrik tidak dapat diaplikasikan dalam logam non-*ferrous*. Oleh karena itu untuk menyambungkan dua buah material yang beda jenis (*disimilar*) juga akan sulit. Selain sulit diaplikasikan untuk menyambung material non *ferrous* dan menyambung material yang berbeda. Pengelasan busur listrik juga sulit diaplikasikan untuk menyambungkan dua buah logam pejal dengan sempurna. Pengelasan busur listrik baru mampu menyambungkan dua buah plat logam atau mengelas bagian permukaan saja sedangkan pada sambungan dua buah logam pejal belum mampu menyambungkan secara sempurna. Pengelasan dengan elektroda terbungkus cocok digunakan untuk pengelasan permukaan plat-plat datar akan tetapi untuk menyambung benda pejal akan sangat sulit untuk dilakukan jika tetap dipaksakan maka hasilnya akan kurang baik [28]. Proses penyambungan dapat diselesaikan sangat cepat dengan cara pemanasan setempat dan bergerak sepanjang sambungan mengikuti material untuk melebur dan membeku, yang mana akan

disertai dengan berbagai problem. Salah satu metode pengelasan yang dapat memecahkan masalah adalah dengan pengelasan gesek (*friction welding*), pengelasan gesek merupakan penyambungan logam tanpa pencairan [29].

2.4 *Friction welding*

Teknologi las gesek (*friction welding*) merupakan salah satu metode atau proses pengelasan jenis *solid state welding*. Panas yang ditimbulkan terjadi karena dua logam yang bergesekan. Dengan mengkombinasikan panas dan diberi tekanan tekan maka dua buah logam akan tersambung. Semakin tinggi tekanan tekan semakin tinggi kekuatan sambungan, semakin tinggi pula kekuatan puntir sambungan, perubahan ini selaras perubahan nilai kekerasan pada logam las dan perubahan struktur mikro. Di era teknologi sekarang ini mulai banyak diperhatikan, karena proses operasinya cepat karena tidak memerlukan logam pengisi, mesin las gesek menyerupai mesin bubut dan hanya digunakan untuk memberikan panas dan tekanan tekan. Pengelasan cair ialah proses pengelasan yang dilakukan dengan cara memanaskan bagian yang akan disambung hingga mencair dengan sumber panas dari energi listrik atau api dari pembakaran gas baik menggunakan bahan tambah ataupun tanpa menggunakan bahan tambahan (*filler*/elektroda). Pengelasan padat ialah proses pengelasannya menggunakan panas atau tekanan akan tetapi tidak terjadi peleburan pada logam inti dan tanpa penambahan logam pengisi. Pengelasan padat diklasifikasikan menjadi beberapa metode diantaranya las tempa dan las gesek (*friction welding*). Dalam metode ini panas dihasilkan dari perubahan energi

mekanik kedalam energi panas pada bidang *interface* benda kerja karena adanya gesekan selama gerak putar di bawah tekanan dan gesekan [30].



Gambar 2.1 Mekanisme Kerja *Friction welding*

Pada Gambar 2.1 terlihat bahwa (1) logam sebelah kiri berputar (2) sedangkan benda kerja sebelah kanan didorong oleh hidrolik/pneumatik kedepan, sehingga mengenai logam yang berputar dan memungkinkan menghasilkan gesekan. Adanya gesekan ini sebagai sumber panas, sedangkan sumber panas ini tergantung dari besarnya putaran dan tekanan gesek. Setelah temperatur tercapai maka mesin las gesek dihentikan dan satu sisi diberi tekanan tempa sehingga terjadi proses penempaan. Berdasarkan bentuk kurva pada *friction welding* dibagi menjadi tiga fase yaitu:

1. Fase gesekan (*friction phase*) fase untuk meningkatkan temperatur, temperatur bisa panas karena dua buah logam yang saling bergesekan fase ini termasuk fase yang membutuhkan waktu lebih banyak daripada fase lainnya.

2. Fase pengereman (*breaking phase*) fase ini diharapkan putaran cepat berhenti agar panas yang dihasilkan tidak hilang.
3. Fase penempaan/upset (*forging phase*) fase ini melakukan penempaan/upset harus tepat pada temperaturnya karena jika tidak tepat temperaturnya hal ini bisa mempengaruhi hasil.

Daerah pengaruh panas (HAZ) pada logam yang disambung relatif sempit karena panas yang terjadi tidak sampai mencapai temperatur cair logam dan adanya tekanan tekan memungkinkan efek negatif panas logam akan tereliminasi. Namun teknologi ini belum banyak diterapkan pada industri menengah. *Friction welding* atau las gesek memiliki beberapa keuntungan dibanding dengan *fusion welding* diantaranya yaitu lebih menghemat material, dapat menyambung material bulat maupun tidak bulat, dapat menyambung material yang serupa maupun berbeda jenisnya. Tidak hanya aluminium, logam logam lain seperti *stainless steel* atau bahkan aluminium dan *stainless steel* terbukti dapat dilas dengan metode *friction welding*. Las gesek (*friction welding*) dinilai lebih baik jika dibandingkan dengan las konvensional dalam hal adanya porositas, karena las gesek (*friction welding*) hanya mengandung sedikit porositas mikro pada sambungan las. Las gesek (*friction welding*) selain bertujuan untuk mempermudah dan meringankan proses pengerjaan juga bertujuan mendapatkan efisiensi maksimum pada proses pengelasan dimana dalam proses las gesek akan selalu menghasilkan pemendekan yang disebabkan munculnya *flash* yang berbentuk menyerupai cincin. Semakin banyak *flash* yang muncul akan menyebabkan semakin banyaknya material yang terbuang [31]. Sedangkan *burn off length* yaitu merupakan panjang spesimen yang berkurang

akibat adanya gesekan antara dua spesimen, lalu salah satu spesimen diberikan tekanan tempa sehingga akan menimbulkan panas pada dua spesimen tersebut dan mengakibatkan terjadinya deformasi plastis pada spesimen saat proses pengelasan berlangsung [6].

Parameter proses yang penting untuk mendapatkan hasil yang maksimal dalam proses pengelasan gesek (*friction welding*) adalah waktu gesekan material, tekanan gesekan, durasi waktu pemberian tekanan tekan dan kecepatan putar motor penggerak. Faktor lain yang turut mempengaruhi hasil las gesek adalah sudut *chamfer*. Sudut *chamfer* merupakan sudut yang digunakan untuk menghilangkan sudut siku-siku pada benda kerja dimana penggunaan sudut *chamfer* yang sesuai pada spesimen pengelasan gesek (*friction welding*) akan memberikan peningkatan kekuatan tarik pada sambungan las dibandingkan dengan spesimen sambungan las tanpa sudut *chamfer*. Semakin besar nilai tekanan tempa akhir yang diberikan maka akan menurunkan persentase porositas, Persentase porositas yang besar akan menurunkan kekuatan tarik spesimen hasil pengelasan gesek begitu pula sebaliknya persentase porositas yang semakin kecil juga akan meningkatkan kekuatan tarik spesimen hasil pengelasan gesek [32].

Mekanisme kerja *friction welding* melibatkan pemanasan dan deformasi material melalui gesekan dan tekanan. Dalam kasus sambungan aluminium 6063 dan tembaga, parameter *friction pressure* (tekanan gesek) dan *forging pressure* (gaya penekan) memainkan peran penting dalam proses ini. Pada tahap *friction pressure*, permukaan aluminium 6063 dan tembaga bersentuhan dan digerakkan dengan tekanan tertentu, menghasilkan panas akibat gesekan. Panas ini

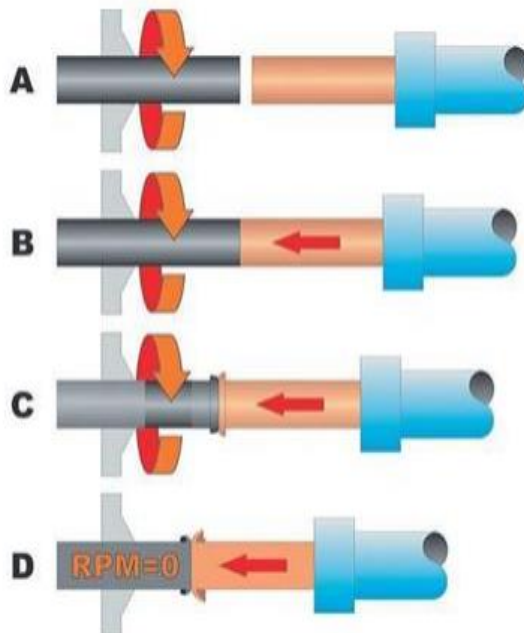
menyebabkan sebagian kecil permukaan-material mencair dan membentuk lapisan cair di antara mereka, menghasilkan penggabungan lokal. Ini berdampak pada sifat mekanik sambungan, dimana kekuatan tarik dapat meningkat karena adanya penggabungan material ditingkat atomistik, sementara kekerasan zona penggabungan dapat bervariasi bergantung pada struktur mikro yang terbentuk. Setelah itu, tahap *forging pressure* dimulai, di mana tekanan tempa diterapkan untuk menyatukan lebih lanjut material yang masih cair atau lembut dari zona penggabungan. Tekanan ini menyebabkan deformasi plastis lebih lanjut dan penggabungan yang lebih erat. Deformasi plastis saat tahap *forging pressure* dapat meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan sambungan, sambil mempertahankan kelenturan tertentu tergantung pada parameter yang digunakan. Hasil akhir dari sambungan *friction welding* dipengaruhi oleh tekanan gesek, tekanan tempa, suhu, dan kecepatan rotasi. Oleh karena itu, pemilihan parameter yang tepat dan karakterisasi yang cermat diperlukan untuk memastikan bahwa sambungan memiliki sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi yang diinginkan.

Defect atau cacat pada *friction welding* adalah ke tidaksempurnaan yang terjadi selama atau setelah proses pengelasan yang memengaruhi kualitas dan kekuatan sambungan. Cacat yang umum terjadi pada *friction welding* adalah *crack* atau retak pada sambungan biasanya terjadi setelah pengelasan akibat tegangan sisa yang terlalu besar. Penyebabnya yaitu parameter proses yang tidak tepat, dan material dengan kompatibilitas yang buruk [33]. Adapun cacat porositas terjadi karena butiran tidak menghasilkan fusi sehingga logam tidak bersatu menyeluruh, hal ini disebabkan temperatur tidak mencapai yang dibutuhkan. Temperatur yang

tinggi dapat dihasilkan dari kecepatan yang semakin tinggi serta lamanya waktu benda bergesekan. Sehingga benda kerja yang dihasilkan memiliki nilai uji tarik yang baik dan cacat porositas dapat direduksi [34].

2.5 *Rotary friction welding*

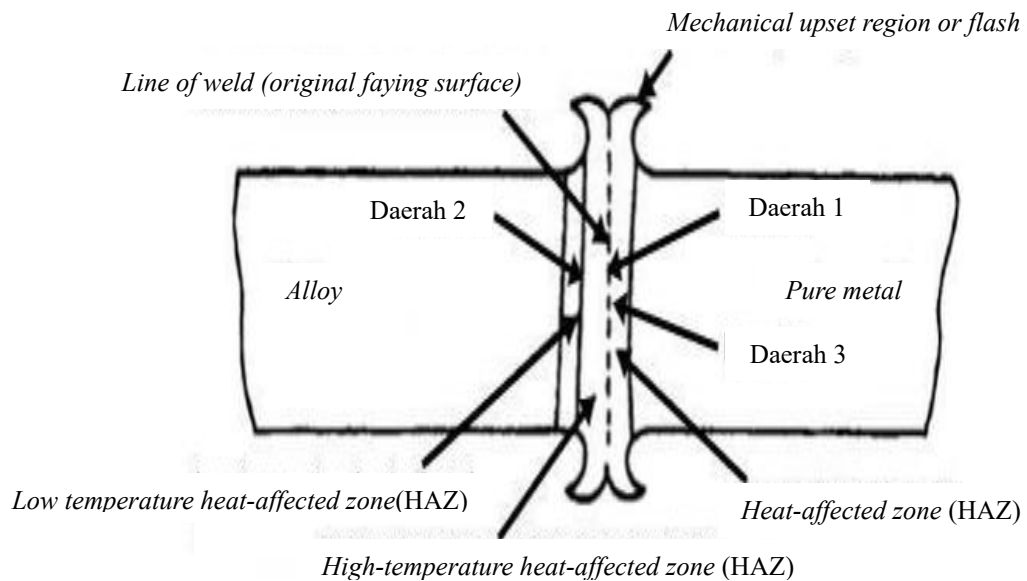
Rotary Friction welding adalah proses penyambungan material logam yang dilakukan dengan cara menggesekan kedua material logam yang akan dilakukan penyambungan sampai kedua logam tersebut mencapai keadaan yang memanaskan dan dilakukan penekanan tempa maka logam tersebut akan tersambung. Panas yang terjadi ditimbulkan dari ujung benda kerja yang saling digesekkan. Pengelasan gesek ini termasuk ke dalam jenis pengelasan *solid state* yang dapat dilihat pada Gambar 2.2 dibawah ini [35].



Gambar 2.2 *Rotary Friction Welding*

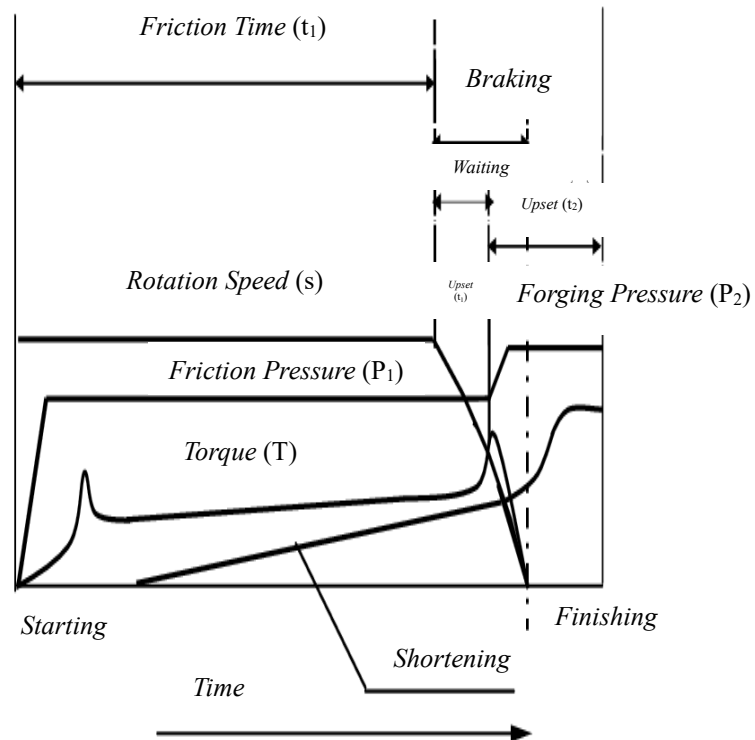
Teknologi las gesek ini mulai banyak diperhatikan, dikarenakan teknologi pengelasan gesek ini sangat mudah di operasikan, proses operasinya

cepat, tidak memerlukan logam pengisi, dan hasil penyambungannya baik. Mesin pengelasan gesek ini menyerupai mesin bubut sehingga mudah dioperasikannya. Dalam keadaan tertentu mesin bubut juga dapat dilakukan proses pengelasan gesek ini namun hanya dapat melakukan pengelasan gesek ini dengan diameter tertentu.



Gambar 2.3 Daerah Pengelasan *Rotary Friction Welding*

Dapat dilihat pada Gambar 2.3 daerah pengelasan *rotary friction welding* terdapat 3 daerah. Daerah 1 adalah fase gesekan (*friction phase*) merupakan daerah dimana dua buah logam di gesekan untuk meningkatkan temperatur. Waktu yang di butuhkan cukup besar dibandingkan daerah lainnya. Daerah 2 adalah fase berhenti (*breaking phase*) dimana pada daerah ini durasi waktu harus secepat mungkin supaya temperatur panas tidak hilang. Daerah 3 adalah fase penempaan / tempa (*forging phase*) dimana pada daerah ini diberi gaya tertentu dan diberi waktu saat penempaan berlangsung [30]. Berikut Gambar 2.4 yang menunjukkan grafik parameter yang digunakan dalam melakukan *rotary friction welding*.



Gambar 2.4 Parameter *Rotary Friction welding*

Pada pengelasan *rotary friction welding* terjadi pembentukan *flash*. *Flash* adalah lelehan yang keluar dari pusat bidang gesekan dan tempaan. Kemudian terjadi juga area yang terkena panas dari pengelesan yang disebut *Heat Affected Zone* (HAZ). *Heat Affected Zone* (HAZ) adalah daerah yang mengalami perubahan struktur mikro dan sifat-sifat mekaniknya akibat pengaruh dari panas yang dihasilkan pada daerah inti. Daerah HAZ merupakan daerah palingkritis dari sambungan las, karena selain berubah strukturnya juga terjadi perubahan sifat pada daerah tersebut. Parameter dalam *rotary friction welding* ini berpengaruh terhadap hasil yang didapat [36]. *Rotary Friction welding* (RFW) yang digunakan untuk melakukan sambungan silinder yang dilakukan tanpa adanya logam pengisi dan dapat dilakukan dengan mudah dan cepat, sudah mulai diterapkan dalam dunia

industri. RFW dalam dunia industri digunakan untuk menyambung komponen yang berbentuk silinder baik itu menggunakan logam sejenis atau berbeda jenis logamnya [11].

Pada *friction welding* antara aluminium 6063 dan tembaga, parameter *Forging pressure* memiliki pengaruh signifikan terhadap kualitas pengelasan. Berikut adalah penjelasan mengenai pengaruh *Forging pressure*:

2.5.1 *Forging pressure* (Tekanan Tempa)

Forging pressure adalah tekanan yang diberikan pada antarmuka material selama proses *friction welding*. Peningkatan *Forging pressure* meningkatkan kontak antara material, mempromosikan deformasi plastik, dan membantu dalam pembentukan ikatan yang lebih kuat antara aluminium dan tembaga. Namun, tekanan gesekan yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan deformasi berlebih, penurunan kekuatan material, atau bahkan cacat pengelasan. Diperlukan penyesuaian *Forging pressure* yang optimal untuk mencapai kualitas pengelasan yang diinginkan [37].

Penelitian yang dilakukan oleh Chapke pada tahun 2022 bertujuan untuk mencapai kekuatan tarik maksimum (UTS) untuk sambungan las gesek melalui optimasi parameter proses las gesek. Parameter yang digunakan seperti tekanan gesek 39, 48 MPa, tekanan tempa 80, 98 MPa. Studi tersebut menemukan bahwa waktu tekan, tekanan tempa, dan tekanan pengempaan adalah parameter proses yang dominan dan memiliki pengaruh lebih besar pada kekuatan las. Kekuatan sambungan las meningkat dengan peningkatan waktu tekan dan tekanan pengempaan hingga batas tertentu.

Waktu las yang tidak mencukupi menghasilkan sambungan las gesek yang lemah. Studi tersebut juga mengidentifikasi bahwa, tekanan tempa yang tinggi akan meningkatkan kekerasan sambungan, dan peningkatan nilai tekanan tempa menghasilkan peningkatan kekuatan tarik sambungan [38].

Penelitian yang dilakukan oleh Chapke pada tahun 2020 hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter-proses seperti tekanan gesek (FP), waktu gesek (FT), dan tekanan pengempaan (UP) memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan las gesek putar antara AA6063 dan AISI4130 serta AA6063 dan tembaga. Berdasarkan analisis ANOVA, FP memiliki pengaruh paling signifikan terhadap kekuatan tarik, diikuti oleh FT, dan UP memiliki pengaruh paling kecil. Peningkatan nilai FP, FT, dan UP pada awalnya meningkatkan kekuatan tarik sambungan las, namun peningkatan nilai tersebut pada akhirnya menurunkan kekuatan tarik sambungan las. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa tekanan pengempaan yang lebih tinggi dapat meningkatkan kekuatan tarik sambungan las antara AA6063 dan tembaga [39].

Penelitian yang dilakukan oleh Zhu pada tahun 2022 parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai tekanan tempa primer 1,2 MPa, tekanan tempa sekunder: 1,5 MPa, tekanan tempa 2,2 MPa, waktu tekan primer 9 detik, waktu tekan sekunder 6 detik, waktu tekan: 3 detik, kecepatan rotasi 700-1200 rpm. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan rotasi yang berbeda pada sambungan las gesek (*friction welding*) tak seragam antara aluminium 6061-T6 dan batangan tembaga memiliki

pengaruh pada suhu puncak permukaan, struktur makro, struktur mikro, dan sifat mekanik dari sambungan las. Dalam penelitian ini, kecepatan rotasi yang optimal untuk mencapai kekuatan tarik tertinggi adalah 1000 rpm, dengan nilai kekuatan tarik sebesar 212 MPa dan efisiensi penyambungan sebesar 73,1% dari kekuatan bahan dasar aluminium 6061-T6 [40].

Penelitian yang dilakukan oleh Kimura pada tahun 2017 untuk menginvestigasi mekanisme penyambungan dan sifat mekanik dari sambungan gesek antara paduan aluminium dan baja tahan karat. Parameter yang digunakan kecepatan gesekan 27,5 s⁻¹ (1650 rpm), tekanan gesek 30 MPa, rentang waktu tekan dari 0,04 hingga 5,0 detik, rentang tekanan tempa dari 30 hingga 240 MPa, dan waktu tekanan tempa 6,0 detik. Hasil penelitian jurnal tersebut menunjukkan bahwa sambungan gesek antara paduan aluminium dan baja tahan karat dapat dicapai dengan menggunakan tekanan tempa yang tinggi dan waktu gesek yang tepat. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini meliputi pengukuran torsi gesek, suhu, dan tekanan tempa, serta pengujian mekanik dan metalurgi pada sambungan yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa sambungan yang dihasilkan dengan tekanan tempa 240 MPa dan waktu tekan yang tepat memiliki kekuatan dan ketangguhan yang baik [41].

Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Romadhan pada tahun 2019 proses pengelasan menggunakan parameter tekanan gesek dengan parameter *friction pressure* 30, 35, dan 40 MPa. Putaran mesin tetap dijaga konstan yaitu 1000 rpm menggunakan tekanan tempa 80 MPa dengan

masing-masing waktu tempa dan gesek adalah 5 detik. Berdasarkan hasil penelitian pengelasan gesek *dissimilar* silinder pejal baja-tembaga dengan parameter tekanan gesek 30 MPa, 35MPa, 40 MPa dapat disimpulkan kekuatan tarik sambungan *dissimilar* meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan gesek sampai dengan 35 MPa yaitu sebesar 96 MPa mencapai 80 % kemudian menurun pada tekanan gesek yang lebih tinggi. Sedangkan pada tekanan yang lebih tinggi, 35 MPa diperoleh kekuatan tarik tertinggi yaitu sebesar 96 MPa. Hal itu menunjukkan bahwa kemungkinan terbentuknya ikatan adhesi di *interface* sudah terjadi dalam pengamatan struktur mikro sebelumnya. Kekuatan tarik ini mencapai kurang lebih 80% dari kekuatan tarik dari material Al-Cu dan meningkatkan kekuatan kekerasan [42].

2.5.2 Kecepatan putaran

Dalam penelitian yang telah dilakukan oleh Setiawan pada tahun 2022 proses pengelasan menggunakan parameter kecepatan putaran sebesar kecepatan Putar (1230, 1500, 2500 rpm) kekasaran permukaan kontak (#100, #800, #1500). Dari hasil penelitian proses pengelasan dengan metode *friction welding* yang telah dilakukan variasi parameter kecepatan dan kekasaran permukaan yang berbeda, pada hal ini kecepatan putar yang paling memengaruhi dalam perubahan nilai kekerasan terhadap kedua material. Pada kecepatan putar 1230, jika dirata-ratakan mendapatkan nilai 54,2 HVN pada aluminium, dan 112,7 HVN tembaga. Kecepatan 1500 mendapatkan nilai 51,1 HVN pada aluminium dan 112,8 HVN pada tembaga. Kecepatan

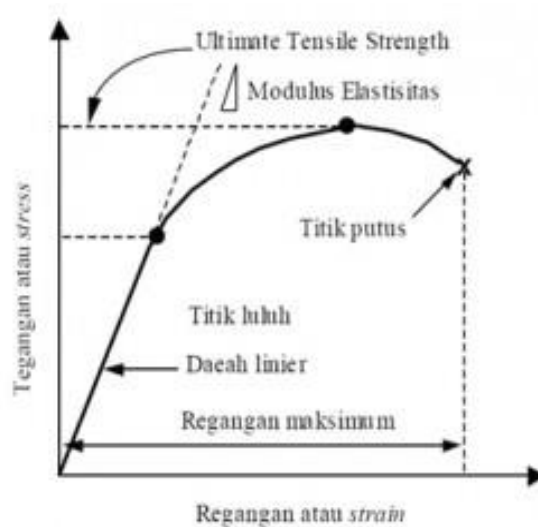
2500 mendapatkan nilai rata-rata 53,5 HVN pada aluminium dan 107,6 pada tembaga. Jika dilihat pada data yang telah didapatkan, nilai kekerasan dari variasi 1230 rpm adalah yang paling tinggi. Jika dilihat pada variasi kekasaran permukaan, hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut: nilai kekerasan pada aluminium rata-rata kekasaran permukaan #100 adalah 51,27 HVN, kekasaran permukaan #800 53,28 HVN, dan kekasaran permukaan #1500 54,18 HVN. Sedangkan pada material tembaga, nilai kekerasan pada variabel kekasaran permukaan #100 adalah 107,54 HVN, kekasaran permukaan #800 113,26 HVN, kekasaran permukaan #1500 112,17 HVN. Maka nilai kekerasan yang paling tinggi adalah pada variasi kekasaran permukaan #1500 untuk material Aluminium dan kekasaran permukaan #800 untuk material tembaga. Dari hasil pengujian tarik yang telah dilakukan, didapatkan nilai kuat tarik pada variasi kecepatan putar 1230 rpm jika dirata-ratakan nilainya adalah 6,08 kg/mm² atau 59,6 MPa. Untuk variasi kecepatan putar 1500 rpm nilai rata-ratanya adalah 2,98 kg/mm² atau 29,2 MPa. Variasi kecepatan 2500 rpm nilai rata-ratanya adalah 4,1 kg/mm² atau 39,8 MPa. Untuk variasi kekasaran permukaan, kekasaran #100 mendapatkan nilai tertinggi, yang jika dirata-ratakan yaitu 5,36 kg/mm² atau 52,4 MPa. Sehingga, hasil pengujian tarik yang paling maksimal adalah dengan variasi kecepatan putar 1230 rpm dan kekasaran permukaan #100.

Dari hasil dan pembahasan yang telah diolah, dapat disimpulkan bahwa kekuatan tarik yang didapatkan oleh sambungan las Al-Cu dengan

menggunakan variasi kecepatan putar cenderung menurun seiring bertambahnya kecepatan putar sedangkan untuk pengamatan struktur mikro dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan pada bagian aluminium, butir hitam yang terlihat adalah Mg_2Si , dari *base metal* – HAZ butir hitam semakin lebar dan lebih banyak. Pada variasi kecepatan 1230 rpm struktur mikro lebih rapat dan halus dibandingkan dengan hasil dari variasi kecepatan 1500 dan 2500 rpm. Sedangkan untuk bagian tembaga, dari *base metal* – HAZ butiran mengecil dan cenderung menyebar [8].

2.6 Pengujian tarik

Pengujian tarik adalah metode yang digunakan untuk mengetahui kekuatan material dengan memberikan beban yang kuat. Alat yang dipakai dalam menguji spesimen uji adalah mesin uji tarik yaitu dengan menarik spesimen uji hingga putus. Hasil dari pengujian tarik adalah berupa fenomena hubungan yang terjadi antara tegangan dan regangan selama proses pengujian tarik [43].



Gambar 2.5 Contoh Kurva Hasil Uji Tarik

Selain diperoleh spesimen uji yang putus pasca proses penarikan, dalam proses ini juga dihasilkan kurva uji tarik dari spesimen uji. Kurva uji tarik ini adalah gambaran dari proses pembebanan yang terjadi pada spesimen kerja dari dimulainya awal penarikan hingga spesimen menjadi putus. Melalui kurva uji tarik pada Gambar 2.5 dapat diperoleh sifat mekanik suatu material. Beberapa sifat mekanik suatu material yakni mulai dari kekuatan tarik, keuletan dan elastisitas. Dengan persamaan tegangan dan regangan sebagai berikut:

$$\text{Tegangan } \sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan:

σ : Tegangan (N/mm² atau Pa)

F : Gaya tarik yang diterapkan (N)

A : Luas penampang awal (mm²)

$$\text{Regangan } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan:

ε : Regangan

ΔL : Penambahan panjang

L_0 : Panjang awal

$$\text{Modulus Young } E = \sigma/\varepsilon \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan:

E: Modulus Young (N/m²)

σ : Tegangan (N/m²)

ε : Regangan

ASTM E8/E8M-22 adalah standar uji tarik yang dikeluarkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Standar ini digunakan untuk menguji sifat mekanik bahan logam dengan metode uji tarik. Dalam uji tarik ASTM E8/E8M-22, sampel bahan logam diuji dengan menerapkan gaya tarik secara aksial pada sampel. Tujuannya adalah untuk menentukan beberapa sifat mekanik penting, termasuk kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), batas elastis (*yield strength*), regangan pecah (*elongation*), dan modulus elastisitas (*elastic modulus*) [45].

2.7 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan (*hardness*) yaitu kemampuan material logam dalam menerima gaya berupa penetrasi dan kekuatan (*strength*) yaitu kemampuan material logam dalam menerima gaya berupa tegangan tanpa mengalami patah. Kedua sifat mekanik logam tersebut diatas merupakan sifat mekanik yang menyatakan kemampuan suatu logam atau material dalam menerima suatu beban atau gaya tanpa mengalami kerusakan pada logam tersebut [46]. Standar yang digunakan pada pengujian kekerasan *micro Vickers* yaitu ASTM E92-17 [47]. Menurut Fatha [11] kekerasan adalah ukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis terlokalisasi. Saat ini metode yang digunakan untuk melakukan pengujian kekerasan yaitu metode *Vickers*.

Pengujian kekerasan *Vickers* biasanya digunakan untuk material yang mempunyai tingkat kekerasan tinggi dan tidak dapat diukur dengan metode pengujian kekerasan dengan *brinell*. Indentornya adalah piramida intan yang

memiliki dasar berbentuk persegi dengan beban 1 – 120 kgf. Pembebanan dilakukan selama 10 – 15 detik dan jejak yang ditimbulkan dengan bentuk intan diukur kedua diameternya dalam mm [47]. Untuk nilai kekerasannya dapat digunakan persamaan 2.4 berikut ini .

$$Vickers\ Hardness = \frac{1,854 \times P}{d^2} \dots\dots\dots (2.4)$$

Di mana:

- P = beban indentasi (kgf)
- d = rata – rata diameter bekas indenter (mm)



Gambar 2.6 Uji Kekerasan *Microhardness Vickers*

2.8 Analisis struktur mikro

Mikroskop Optik (OM) adalah alat yang digunakan untuk memperbesar dan mengamati struktur mikro dari suatu material dengan menggunakan cahaya tampak. Dalam analisis mikrostruktur, OM sering digunakan untuk mengamati morfologi, distribusi fasa, ukuran butir, dan berbagai fitur lain dari material. OM memanfaatkan lensa untuk memfokuskan cahaya yang dipantulkan atau

ditransmisikan oleh sampel, sehingga menghasilkan gambar yang dapat diamati oleh mata atau didokumentasikan dengan kamera. Prinsip dasar mikroskop optik adalah sumber cahaya tampak digunakan sebagai sumber utama untuk menerangi sampel. Sistem lensa objektif dan okuler memperbesar gambar sampel. Resolusi yang erbatas pada panjang gelombang cahaya tampak (~ 200 nm). Dalam konteks metalurgi, OM sering digunakan untuk mempelajari mikrostruktur logam setelah melalui proses preparasi seperti pengamplasan, pemolesan, dan etsa. Preparasi ini dilakukan untuk memunculkan fitur struktur mikro seperti batas butir, fasa, dan inklusi yang ada di dalam logam.[48].

Analisis struktur mikro pada *friction welding* (pengelasan gesek) adalah proses penyambungan dua material dengan menggunakan panas yang dihasilkan oleh gesekan antara dua permukaan material yang saling ditekan dan digerakkan. Analisis struktur mikro pada *friction welding* (pengelasan gesek) adalah proses penyambungan dua material dengan menggunakan panas yang dihasilkan oleh gesekan antara dua permukaan material yang saling ditekan dan digerakkan. Pada proses ini, terdapat beberapa zona strutkur mikro yang terbentuk akibat termal dan mekanikal dari proses gesekan, yaitu *heat affected zone* (HAZ) yaitu wilayah di sekitar sambungan yang mengalami perubahan sifat struktur mikro akibat panas. *Weld zone* yaitu bagian inti dari sambungan, yang umumnya mengalami rekristalisasi. Menggunakan OM untuk mempelajari *friction welding* memungkinkan pengamatan langsung terhadap perubahan struktur mikro di berbagai zona. Pada *friction welding*, OM dapat membantu mengidentifikasi: ukuran butir yang mengalami rekristalisasi, homogenitas material dan distribusi

fasa di daerah sambungan. *Defect* yang mungkin muncul seperti porositas atau retakan mikro. Analisis struktur mikro ini dapat membantu dalam evaluasi kekuatan, kekerasan, kelarutan, dan performa mekanik keseluruhan dari hasil pengelasan *friction welding* [44].