

BAB II KAJIAN PUSTAKA

2.1 Landasan teori

Aluminium banyak digunakan pada industri otomotif karena densitasnya rendah, ketahanan korosinya baik, serta mampu meningkatkan efisiensi energi kendaraan. Material ini juga memberikan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, sehingga sangat sesuai untuk struktur kendaraan modern, termasuk paduan Al6061 dan Al5052 yang dikenal stabil secara mekanik dan mudah diproses (Tabrizi et al., 2020).

Sejalan dengan kebutuhan tersebut, *Friction Stir Welding* (FSW) menjadi salah satu metode penyambungan yang semakin diandalkan karena prosesnya berlangsung dalam keadaan padat. Teknologi ini mampu menghindari cacat pengelasan konvensional seperti porositas dan distorsi termal, serta menghasilkan sambungan yang stabil dengan perubahan mikrostruktur yang lebih terkendali (Boukraa et al., 2021).

Untuk mencapai kualitas sambungan terbaik, parameter proses terutama kecepatan putaran memiliki peran sangat penting. Variasi putaran dapat mempengaruhi jumlah panas gesekan, pola aliran material, serta mekanisme rekristalisasi yang berdampak pada kekuatan, kekerasan, maupun struktur mikro hasil las. Putaran yang terlalu tinggi berpotensi menurunkan kekuatan akibat pelunakan pada HAZ, sedangkan putaran optimum menghasilkan adukan yang homogen dan butir yang lebih halus (Koesgi et al., 2024).

Pada penyambungan material tidak sejenis seperti Al6061 dan Al5052, tantangan semakin kompleks karena perbedaan komposisi kimia dan respons termal kedua paduan. Ketidakhomogenan zona adukan dan perubahan mikrostruktur yang tidak seragam sering menyebabkan penurunan kekuatan sambungan, terutama pada HAZ dan *stir zone* yang menjadi titik rawan kegagalan (Arsyad Suyuti et al., 2020).

Sifat fisik-mekanik seperti kekerasan, kekuatan tarik, dan morfologi butir sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran yang mengontrol distribusi panas.

Variasi putaran 1000 rpm, 1200 rpm, dan 1500 rpm pada pengelasan AA5052 terbukti menghasilkan perbedaan signifikan pada ukuran butir, kekerasan, dan kekuatan tarik, di mana kekuatan tarik tertinggi dicapai pada 1000 rpm, menunjukkan bahwa panas berlebih pada rpm tinggi menyebabkan pelunakan material. Temuan tersebut menegaskan pentingnya optimasi kecepatan putaran untuk memperoleh sambungan yang kuat dan seragam (Koesgi et al., 2024).

Kajian teori menunjukkan bahwa proses *Friction Stir Welding* (FSW) sangat dipengaruhi oleh kecepatan putaran karena menentukan seberapa besar panas dan sebaik apa material dapat tercampur selama penyambungan. Namun, penjelasan yang mudah dipahami mengenai dampak perubahan putaran terhadap bentuk struktur dalam material dan kekuatan sambungan, khususnya pada kombinasi Al6061–Al5052 untuk *body* kendaraan, masih jarang dibahas. Karena itu, penelitian ini penting untuk mengisi kekosongan tersebut dengan mengamati langsung pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap kualitas sambungan FSW.

2.2 Penelitian terdahulu

Sebuah penelitian (Faza et al., 2025) mengkaji dampak modifikasi *Friction Stir Welding* (FSW) pada material AA5083, dengan fokus pada kecepatan putaran pahat dan sudut kemiringan, yang memengaruhi struktur mikro dan karakteristik mekanis las. Kecepatan putaran berkisar antara 1100 hingga 1800 rpm, dengan sudut kemiringan masing-masing 1° dan 3° . Hasil optimal dicapai pada 1400 rpm dengan sudut 1° , menghasilkan campuran material yang seragam dan struktur mikro yang halus. Hasil uji kekerasan optimal dicapai pada 1400 rpm dengan sudut 1° . Penulisan ini mengungkapkan bahwa peningkatan kecepatan putaran umumnya meningkatkan fleksibilitas sambungan, tetapi terkadang mengurangi kekuatan tarik.

Pemahaman mengenai pengaruh parameter proses terhadap performa sambungan FSW terus berkembang, sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian yang dilakukan oleh (Pradana et al., 2023) menelaah dampak perubahan kecepatan putaran dan kedalaman pin selama proses *Friction Stir Welding* (FSW) terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur mikro aluminium 5052. Teknik

pengelasan ini memanfaatkan gesekan yang dihasilkan oleh instrumen berputar untuk menyatukan logam tanpa meleleh sempurna. Penulisan ini menggunakan aluminium 5052 dan melakukan *Friction Stir Welding* menggunakan mesin penggilingan vertikal, dengan mengubah kecepatan putar alat pin (910 rpm, 1500 rpm, 2280 rpm) dan kedalaman pin (3 mm, 4 mm, 4,8 mm). Penulisan ini menunjukkan bahwa kekuatan tarik maksimum dicapai pada kecepatan putar 2280 rpm (148,2 MPa) dan kedalaman pin 3 mm (148,9 MPa), yang menunjukkan bahwa kekuatan tarik meningkat seiring dengan kecepatan putar tetapi menurun seiring dengan kedalaman pin. Nilai kekerasan menurun seiring dengan peningkatan kecepatan putar, dengan rata-rata puncak pada kedalaman pin 3 mm (62,49 HV) dan titik terendah pada kecepatan putar 2280 rpm (53,03 HV).

Melanjutkan pemahaman mengenai peran parameter proses pada kualitas sambungan FSW, penelitian yang dilakukan oleh (Sindhuja et al., 2021) mengkaji pengaruh parameter proses *Friction Stir Welding* (FSW) terhadap karakteristik mekanis dan struktur mikro sambungan paduan aluminium AA6061 dan AA5052. Tujuan utama penulisan ini adalah untuk menentukan pengaturan pengelasan ideal yang memaksimalkan kekuatan sambungan dan untuk menjelaskan dampak parameter-parameter ini terhadap kekuatan dan struktur mikro sambungan yang dihasilkan. Hasil penulisan menunjukkan bahwa kecepatan rotasi alat yang lebih tinggi meningkatkan kekuatan tarik sambungan, sementara kecepatan *travers* yang lebih rendah dapat mengurangi pembentukan cacat dan meningkatkan kekuatan sambungan. Selain itu, analisis mikrostruktur menunjukkan adanya penghalusan butir yang berkontribusi pada peningkatan sifat mekanik, dengan sambungan yang dihasilkan bebas dari cacat seperti *voids*.

Dari ringkasan di atas, dapat disimpulkan bahwa FSW merupakan teknik pengelasan yang efektif untuk berbagai jenis aluminium. pengaruh variasi kecepatan putaran pada proses FSW terhadap sifat fisik mekanis dari AL6061 dan AL5052 sangat krusial untuk aplikasinya pada *body* kendaraan. Keberhasilan dalam meningkatkan sifat mekanik sangat dipengaruhi oleh parameter seperti

kecepatan putaran, kedalaman pin, dan *feeding speed* yang semuanya dapat dimodifikasi untuk mencapai hasil pengelasan yang optimal. Penulisan lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi aplikasi yang lebih luas dalam berbagai konteks industri, termasuk otomotif dan lainnya.

2.3 Aluminium

Industri logam ringan belakangan ini berkembang pesat. Aluminium adalah logam ringan yang banyak digunakan di sektor otomotif dan kedirgantaraan (Zamzani, 2023). Aluminium digunakan untuk mengurangi bobot kendaraan, meningkatkan efisiensi bahan bakar, dan mengurangi polutan. Selain itu, aluminium juga banyak digunakan di sektor konstruksi sebagai bahan bangunan, di sektor kelistrikan sebagai konduktor, dan dalam kemasan makanan dan minuman karena reaktivitas kimianya (Tsamroh & Riza Fauzy, 2022).

Dalam proses manufaktur, aluminium dapat diproses melalui pengecoran, ekstrusi, penggilingan, hingga pengelasan. Teknik pengelasan seperti *Friction Stir Welding* (FSW) semakin populer untuk menggabungkan aluminium karena menghindari cacat akibat pelelehan logam. Kemampuan aluminium untuk didaur ulang tanpa kehilangan sifat aslinya juga menjadikannya material ramah lingkungan dan berkelanjutan dalam industri modern (Ferreira, 2023).

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah aluminium dengan dua jenis seri yang berbeda yaitu aluminium seri 6061 dan aluminium seri 5052. masing-masing dengan karakteristik unsur paduan yang berbeda. Al6061 merupakan paduan aluminium-magnesium-silikon (Al-Mg-Si) yang dapat dikeraskan melalui perlakuan panas, sedangkan Al5052 merupakan paduan aluminium-magnesium (Al-Mg) yang tidak dapat dikeraskan melalui perlakuan panas tetapi memiliki ketangguhan dan ketahanan korosi yang tinggi.

1. Aluminium 6061

Alumunium 6061 merupakan paduan tempa yang banyak digunakan karena kekuatannya yang moderat, ketahanan korosi, dan kemampuan mesinnya. Paduan ini, yang sebagian besar terdiri dari magnesium dan silikon, cocok untuk aplikasi pengelasan dan pembentukan. Paduan ini banyak

digunakan di sektor otomotif, konstruksi, kedirgantaraan, dan industri ringan. Logam ini memiliki ketahanan korosi yang signifikan karena reaktivitasnya yang kuat, yang mengakibatkan terbentuknya lapisan oksida tipis pada permukaannya. Setelah terpapar udara dan terkelupas, lapisan baru akan terbentuk dengan cepat (Derniawan, 2021). Pada tabel 2.1 menunjukkan hasil uji komposisi material aluminium 6061.

Tabel 2.1 Hasil uji komposisi AL6061

Unsur	Sampel Uji (%)	Standar 6061 (%)
Al	97,46	95 – 98
Cu	0,222	0,15 – 0,40
Mg	0,973	0,8 – 1,2
Si	0,592	0,4 – 0,35
Fe	0,376	Maks 0,7
Mn	0,100	Maks 0,15
Zn	0,053	Maks 0,25
Ti	0,026	Maks 0,15
Cr	0,133	0,04 – 0,35

2. Aluminium 5052

Aluminium 5052 merupakan paduan yang terdiri dari aluminium dan magnesium (Mg). Paduan ini tidak dapat diolah dengan panas tetapi memiliki ketahanan korosi yang sangat baik, terutama terhadap korosi air garam. Kemampuan las Al-Mg banyak digunakan dalam konstruksi umum, termasuk pembuatan kapal. Material ini banyak digunakan dalam aplikasi suhu rendah, peralatan maritim, dan rangka struktural (Renaldo et al., 2020). Pada tabel 2.2 menunjukkan hasil uji komposisi material aluminium 5052.

Tabel 2.2 Hasil uji komposisi AL5052

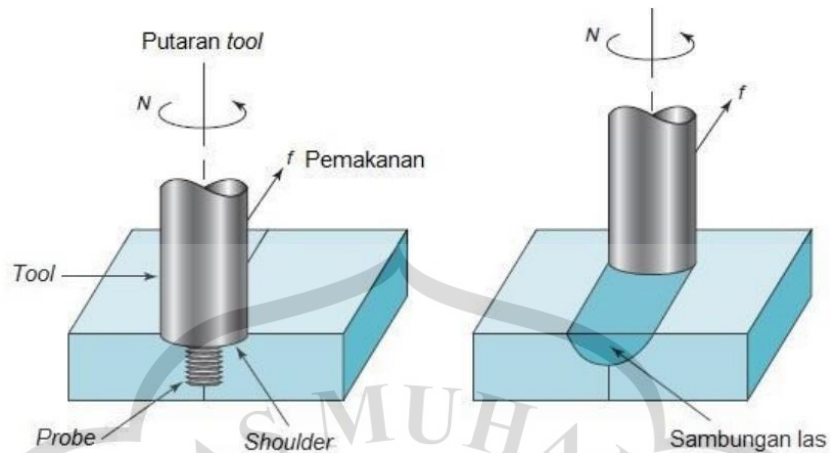
Unsur	Sampel Uji (%)	Standar 5052 (%)
Al	96,48	95 - 97
Cu	0,10	≤ 0,10
Mg	2,2	2,2 - 2,8
Si	0,25	≤ 0,25
Fe	0,40	≤ 0,40
Mn	0,10	≤ 0,10
Zn	0,10	≤ 0,10
Ti	0,02	-
Cr	0,35	0,15 – 0,35

2.4 *Friction Stir Welding (FSW)*

Friction Stir Welding (FSW) adalah salah satu jenis *Solid state welding (SSW)* yang memanfaatkan gesekan yang dihasilkan antara pahat dan benda kerja untuk memfasilitasi penyambungan. Prosedur pengelasan ini dikembangkan oleh Wayne Thomas dari *The Welding Institute* dan dipatenkan di Inggris pada bulan Desember 1991. Sejak awal, *Friction Stir Welding* telah mengalami kemajuan pesat melalui berbagai penulisan, termasuk parameter pahat, parameter proses, dan desain sambungan (Schwartz, 2010).

Kelemahan metode pengelasan ini antara lain gaya tekan yang besar dan kebutuhan akan klem yang kuat untuk menahan getaran pelat. *Friction Stir Welding* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode pengelasan lainnya yaitu dapat diterapkan di semua orientasi horizontal dan vertikal, tidak menghasilkan asap berbahaya atau cipratan material cair, sehingga meminimalkan dampak lingkungan, dan tidak memerlukan pin baja habis pakai (Huda, 2018).

2.5 Prinsip kerja FSW



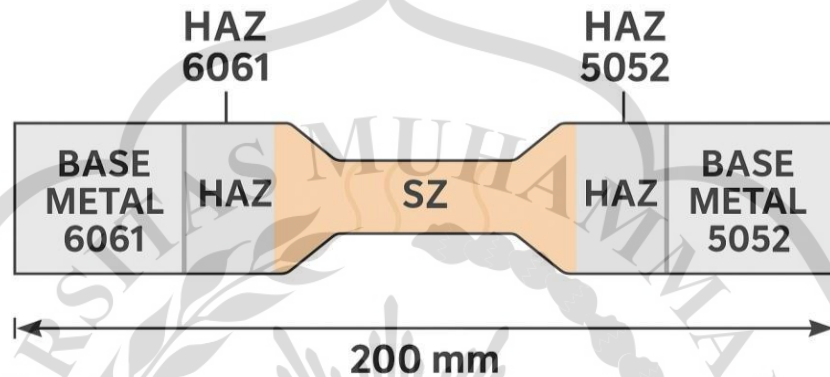
Gambar 2.1 Prinsip kerja FSW (Syafi'i Abdullah, 2019)

Dalam (FSW), sebuah alat las, dengan atau tanpa *probe* berprofil, berputar dan bergerak dengan kecepatan seragam di sepanjang sambungan antara dua material yang akan dilebur. Benda kerja harus diikat dengan aman pada ragum untuk mempertahankan posisinya terhadap gaya yang dihasilkan selama pengelasan. Panjang *probe* harus kurang dari ketebalan benda kerja, dan bahu alat las harus menyentuh permukaan benda kerja.

Panas gesek dalam *Friction Stir Welding* (FSW) dihasilkan oleh gesekan antara *probe*, bahu alat las, dan material benda kerja. Panas tersebut bersama dengan panas yang dihasilkan oleh proses pencampuran mekanis, memungkinkan material yang diaduk melunak tanpa melampaui titik lelehnya, sehingga alat las dapat bergerak melintasi jalur las. Saat *pin* alat las bergerak melintasi jalur las, permukaan depan *pin* memberikan gaya dorong plastis pada material ke arah belakang *pin*, sekaligus memberikan gaya tempa yang substansial untuk memadatkan logam las. Komponen yang akan dilas harus dijepit dengan aman dan disejajarkan pada pelat penyangga untuk memastikan bahwa gaya yang diberikan pada alat dan ditransfer ke benda kerja tidak menyebabkan deformasi pada bagian bawah pelat yang dilas. Panas menyebabkan pelunakan material di sekitar *pin*, dan akibat gerak rotasi dan translasi alat, material di depan *pin* bergeser ke belakang. Proses ini berlanjut

selama gerak translasi berlangsung, sehingga menghasilkan sambungan yang diinginkan (Rahayu, 2012).

Dalam proses *Friction Stir Welding* (FSW), sambungan logam tidak melalui proses pencairan penuh, melainkan melalui deformasi plastis akibat panas gesekan. Hal ini menghasilkan beberapa zona yang berbeda pada struktur hasil las, yaitu:



Gambar 2.2 zona pengelasan

1. *Weld Nugget Zone* (WNZ) atau *Stir Zone* (SZ)

Zona ini terletak tepat di bawah alat las (*pin*), tempat logam mengalami adukan (*stirring*) intensif. Material di zona ini mengalami deformasi plastis tinggi dan rekristalisasi dinamik, menghasilkan struktur mikro halus dan seragam. Kekuatan mekanik zona ini biasanya tinggi karena butirannya halus dan merata (Sorger *et al.*, 2018).

2. *Heat Affected Zone* (HAZ)

HAZ Merupakan daerah yang hanya terpengaruh oleh panas tanpa mengalami deformasi mekanik. Di HAZ, perubahan struktur mikro terjadi akibat paparan suhu tinggi, yang dapat menyebabkan pertumbuhan butir dan menurunkan sifat mekanik material, tergantung pada paduan logam yang digunakan (Tamizi, 2021).

3. *Base Metal* (BM)

Base metal mengacu pada komponen logam yang tidak berubah akibat proses pengelasan, baik dari segi efek termal maupun deformasi. Struktur mikro

dan karakteristik mekanis di area ini sebanding dengan keadaan awal material sebelum proses FSW (S. Nugroho & Sudiarmo, 2012).

Friction Stir Welding (FSW) banyak digunakan dalam industri, terutama untuk penyambungan aluminium dan paduannya. Metode pengelasan ini telah digunakan di negara-negara industri, terutama di sektor perkapalan, misalnya, pada lambung, dek, dan dasbor *speedboat* yang sering digunakan untuk keperluan patroli (Pradana, 2023).

2.6 *Dissimilar*

Dissimilar welding pada pengelasan aduk gesek *Friction Stir Welding* melibatkan penyambungan dua jenis logam yang berbeda, yang memiliki sifat fisik dan mekanik yang tidak sama. Proses ini memanfaatkan gesekan antara alat pengelasan yang berputar dan permukaan logam untuk menghasilkan panas, sehingga memungkinkan material untuk bercampur dan membentuk sambungan yang kuat tanpa mencairkan logam sepenuhnya (Hasnol, 2023).

Keunggulan dari *dissimilar welding* adalah kemampuannya untuk menggabungkan logam dengan karakteristik yang saling melengkapi, seperti kekuatan tinggi dan ketahanan korosi. Pengelasan material yang berbeda merupakan tantangan tersendiri dengan metode tradisional karena karakteristiknya yang berbeda. Teknik konvensional menghasilkan ikatan yang kaku dan getas yang dapat menyebabkan keretakan (Sidiq, 2023). Pengelasan logam yang berbeda membutuhkan pemahaman yang komprehensif tentang karakteristik material dan keahlian dalam prosedur serta kondisi pengelasan yang tepat.

2.7 Cacat dalam *Friction Stir Welding* (FSW)

Friction Stir Welding (FSW) adalah proses pengelasan yang dilakukan dalam keadaan padat, yang mengurangi kemungkinan terjadinya cacat yang umum ditemukan dalam proses pengelasan konvensional. Namun, beberapa cacat masih dapat terjadi, termasuk *voids* (Albannai, 2020)

Voids adalah ruang kosong atau gelembung yang terbentuk di dalam sambungan las. Mereka dapat muncul sebagai hasil dari pengendapan gas atau

ketidakcukupan aliran material selama proses pengelasan. Penyebab terjadi cacat *voids* karena kurangnya aliran material, kecepatan rotasi dan *feeding speed* yang tidak tepat, dan kondisi permukaan. Dampak dari *voids* dapat mengurangi kekuatan sambungan secara signifikan, karena mereka menciptakan titik lemah di dalam struktur. Hal ini dapat menyebabkan kegagalan sambungan di bawah beban (Prabowo, 2013).



Gambar 2.3 cacat voids (Prabowo, 2013)

2.8 Sifat Fisik Mekanik

Kualitas fisik suatu material adalah fitur intrinsik yang dapat dilihat atau diukur tanpa mengubah struktur kimianya, termasuk densitas, titik leleh, dan konduktivitas. Atribut-atribut ini berbeda dengan sifat mekanik karena tidak berkaitan dengan reaksi terhadap beban atau gaya yang diberikan. Penulisan ini mengkaji kualitas fisik yang berkaitan dengan struktur mikro, sedangkan sifat mekanik logam menunjukkan kemampuannya untuk menahan tekanan atau beban yang diberikan tanpa mengalami kerusakan permanen. Oleh karena itu, penjelasan selanjutnya menguraikan tiga aspek mekanik utama, yaitu:

1. Kekuatan (*Strength*)

Kemampuan logam untuk menahan beban atau tekanan tanpa mengalami deformasi atau kerusakan permanen. Kekuatan ini dapat terwujud dalam bentuk tarik, tekan, geser, torsi, dan tekuk. Kekuatan sangat penting dalam bangunan dan peralatan.

2. Kekerasan (*Hardness*)

Kemampuan logam untuk menahan goresan, penetrasi, atau aus. Kekerasan berhubungan dengan ketahanan permukaan logam terhadap abrasi dan gesekan, penting untuk alat potong dan permukaan kerja.

3. Ketangguhan (*Toughness*)

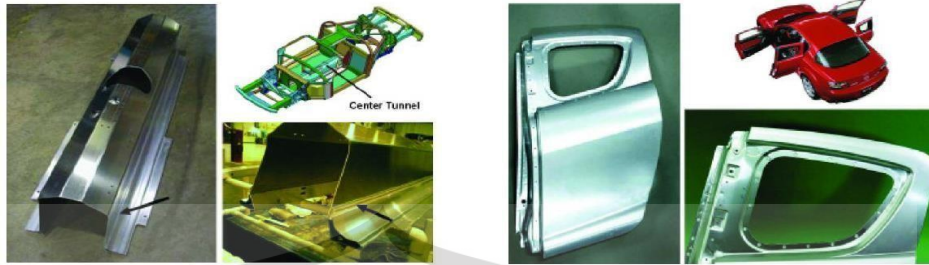
Kemampuan logam menyerap energi dari gaya kejut atau beban tiba-tiba tanpa patah. Ketangguhan mengukur daya tahan logam terhadap beban impact. Sifat-sifat ini diukur dengan berbagai metode pengujian seperti tes tarik, tes impact, dan tes kekerasan (*Brinell, Vickers, Rockwell*) untuk menentukan kemampuan dan batas beban logam dalam aplikasi nyata. Kesimpulannya, sifat mekanik logam meliputi kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan yang sangat penting untuk menentukan penggunaan logam dalam berbagai bidang industri dan teknik (D.I. Tsamroha, 2022)

2.9 Pengaplikasian Pada *Body* Kendaraan

Friction Stir Welding (FSW) adalah metode pengelasan yang inovatif yang memanfaatkan pemanasan akibat terjadinya untuk menciptakan sambungan logam, terutama pada material aluminium seperti AL6061 dan AL5052. Proses ini berlangsung tanpa mencairkan material, sehingga menghasilkan sambungan dengan kualitas tinggi dan minimal cacat. FSW telah terbukti efektif untuk diaplikasikan pada *body* kendaraan, di mana kekuatan dan bobot material sangat krusial. Contoh produk yang dihasilkan FSW ada pada Gambar 2.4.

Penggunaan AL6061 dan AL5052 dalam industri otomotif memberikan keuntungan dalam hal kekuatan dan ketahanan korosi. AL6061, dengan rasio kekuatan-terhadap-berat yang tinggi, ideal untuk struktur kendaraan yang memerlukan kekuatan dan daya tahan yang baik. AL5052 memiliki ketahanan korosi yang luar biasa, menjadikannya pilihan optimal untuk komponen yang menghadapi cuaca dan kondisi ekstrem. Misalnya saja, pabrikan otomotif menggunakan FSW untuk menyambung panel bodi, rangka, dan bagian

struktural lainnya, yang membutuhkan sambungan kuat serta fleksibel dalam desain (Nipa, 2024).



Gambar 2.4 produk FSW (Arbegast, 2006)

2.10 Uji komposisi

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui unsur – unsur pokok dan tambahan apa saja yang terkandung didalam AL6061 dan AL5052. Dari hasil penelitian nanti akan didapatkan kandungan serta komposisi dalam jumlah persen dan banyaknya unsur dalam jumlah persen tersebut. Selain itu juga dapat digunakan untuk proses perlakuan yang dapat diterapkan pada bahan tersebut untuk mendapatkan sifat – sifat yang diinginkan sesuai kebutuhan bahan tersebut (Aryananta Lufti et al., 2024).

2.11 Uji kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan teknik paling efisien untuk menilai kekerasan suatu material, karena memberikan gambaran umum karakteristik mekanisnya. Pengukuran yang dilakukan di lokasi atau wilayah tertentu menghasilkan nilai kekerasan yang andal sebagai indikasi kekuatan material. Uji kekerasan memungkinkan klasifikasi material sebagai daktail atau getas. Uji kekerasan bertujuan untuk memastikan ketahanan material terhadap deformasi lokal atau perubahan permukaan. Untuk logam, deformasi yang relevan adalah deformasi plastis, yang menunjukkan tingkat perubahan ireversibel suatu material sebelum mengalami kegagalan (Syahid et al., 2021). Rumus pengujian kekerasan dapat dilihat dibawah ini.

$$HV = \frac{1,854 \times P}{d^2} \dots\dots\dots (2.1)$$

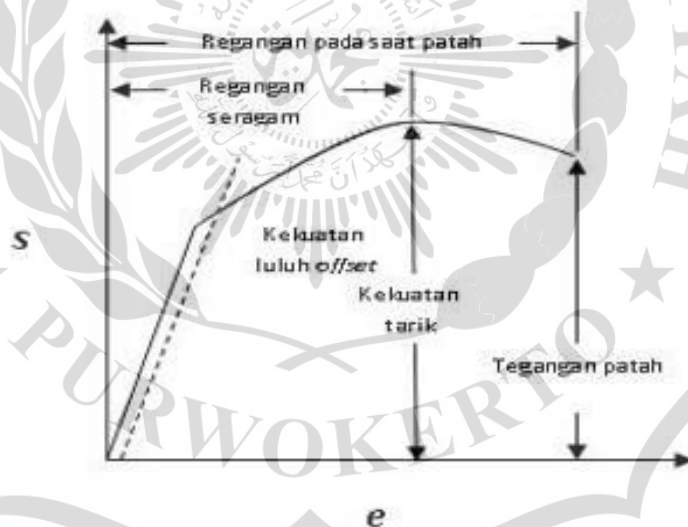
P = beban uji (kgf)

d = rata – rata panjang diagonal lekukan (mm)

2.12 Pengujian tarik

Uji tarik adalah teknik yang digunakan untuk mengevaluasi kekuatan material dengan menerapkan gaya uniaksial. Hasil uji tarik sangat penting dalam rekayasa dan desain produk, karena memberikan data tentang kekuatan material. Uji tarik mengevaluasi ketahanan material terhadap gaya statis yang diterapkan secara bertahap.

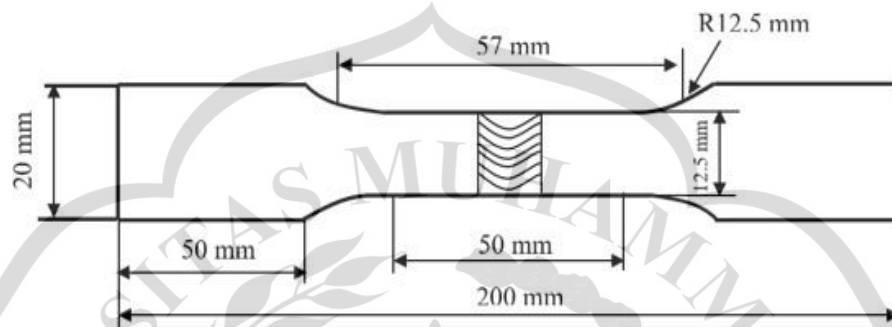
Pengujian tarik dilakukan untuk menentukan kekuatan tarik, tegangan luluh, dan daktilitas yang dinyatakan sebagai persentase regangan. Hasil pengujian ini disajikan dalam bentuk kurva tegangan–regangan pada Gambar 2.6 yang menggambarkan perilaku material selama pembebanan. Melalui grafik tersebut, nilai tegangan luluh dan kekuatan tarik maksimum (*ultimate*) dapat ditentukan dengan lebih akurat berdasarkan perubahan bentuk kurva sepanjang proses pengujian.



Gambar 2. 5 Kurva tegangan dan regangan (Bakhori, 2023)

Gambar 2.5 menunjukkan kurva tegangan–regangan yang menggambarkan respons material saat diberi beban tarik. Pada awalnya, material mengalami deformasi elastis hingga mencapai titik luluh, kemudian memasuki daerah plastis hingga tercapai kekuatan tarik maksimum. Setelah melewati titik ini, material mulai mengalami penurunan kemampuan menahan beban hingga akhirnya patah.

Hasil uji tarik sangat penting dalam rekayasa dan desain produk, karena memberikan data tentang kekuatan material. Uji tarik mengevaluasi ketahanan material terhadap gaya statis yang diterapkan secara bertahap (Salindeho, 2013). Konfigurasi dan pengukuran spesimen untuk uji tarik mematuhi ASTM E8, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Dimensi spesimen uji Tarik (Widodo & Ilman, 2022)

Pengujian tarik dilakukan untuk memastikan kekuatan tarik, tegangan luluh, dan daktilitas yang dinyatakan sebagai persentase regangan. Konfigurasi dan pengukuran spesimen untuk uji tarik mematuhi ASTM E8, seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. Dari pengujian tarik ini, grafik tegangan-regangan dihasilkan, yang memungkinkan penentuan tegangan luluh dan kekuatan tarik maksimal dengan persamaan berikut:

1. Tegangan Tarik

Tegangan tarik merupakan tegangan maksimum yang dapat ditanggung oleh material sebelum terjadinya perpatahan (*fracture*). Kekuatan tarik maksimum dari suatu bahan dapat dirumuskan:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

σ : Tegangan Tarik (N/mm²)

F : Gaya pada Elongasi Maksimum (N)

A : Luas Penampang Spesimen yang Tidak Mengalami Regangan (mm^2)

2. Regangan

Regangan Tarik maksimum adalah pertambahan panjang maksimum yang dihasilkan dari suatu material setelah dilakukan pengujian tarik. Regangan tarik dapat menunjukkan pertambahan panjang dari suatu material.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

- ε : Regangan (%)
- ΔL : Penambahan panjang (mm)
- L_0 : Panjang mula-mula (mm)

3. Modulus Elastisitas

Ukuran kekakuan suatu material dalam grafik tegangan-regangan. Modulus elastisitas tersebut dapat dihitung berdasarkan garis kemiringan garis elastis yang linier.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana:

- E : Modulus elastisitas (Gpa)
- σ : Tegangan (Mpa)
- ε : Regangan (%)

Selanjutnya, mikroskop optik perbesaran rendah akan digunakan untuk mengamati permukaan patahan dari hasil uji tarik. Tujuannya adalah menemukan bentuk patahan dari hasil uji tarik (Widodo, 2022).

2.13 Mikro struktur

Analisis mikrostruktur merupakan aspek penting dalam mengevaluasi kualitas sambungan hasil *Friction Stir Welding* (FSW) karena mencerminkan

pengaruh kondisi termomekanik selama proses pengelasan. Pada sambungan FSW terdapat tiga zona utama, yaitu *Base Metal* (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), dan *Stir Zone* (SZ). Zona SZ mengalami deformasi plastis dan rekristalisasi dinamik akibat pengadukan tool, sehingga menghasilkan butir yang lebih halus dan homogen. Sementara itu, HAZ hanya mengalami pengaruh panas yang dapat menyebabkan perubahan ukuran butir. Variasi kecepatan putaran berperan dalam mengontrol distribusi panas dan aliran material, sehingga berpengaruh langsung terhadap struktur mikro dan sifat mekanik sambungan. (Dewi, 2018).

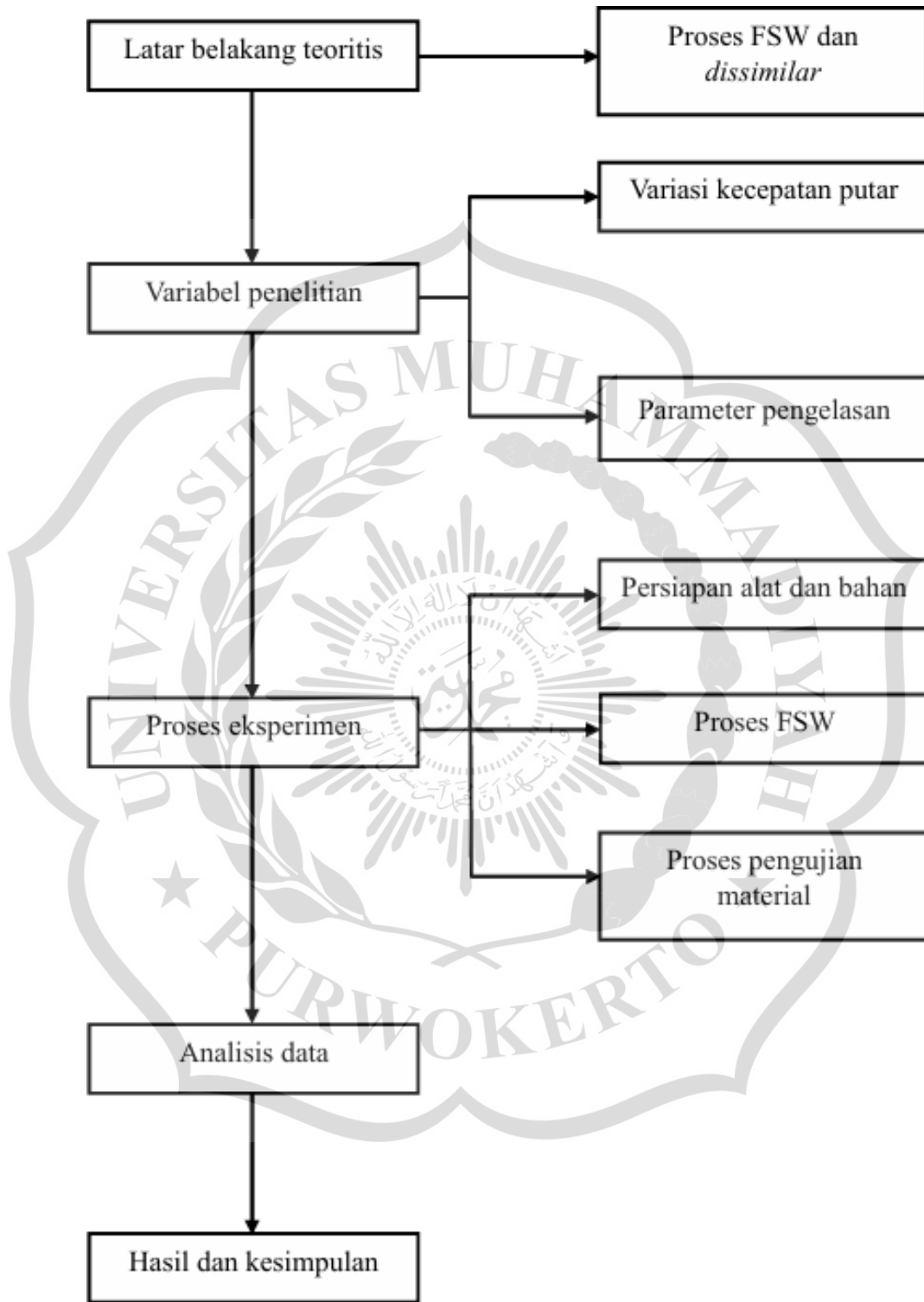
2.14 Parameter pengelasan

Parameter pengelasan merupakan faktor penting yang menentukan kualitas sambungan pada proses *Friction Stir Welding* (FSW), sebagaimana telah dijelaskan pada latar belakang dan landasan teori. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa variasi parameter, khususnya kecepatan putaran tool, berpengaruh langsung terhadap masukan panas, aliran material, serta pembentukan struktur mikro yang selanjutnya memengaruhi sifat mekanik sambungan. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian ini menetapkan parameter pengelasan secara terkontrol untuk mengevaluasi pengaruh variasi kecepatan putaran terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan mikrostruktur sambungan dissimilar Al6061–Al5052. Rincian parameter pengelasan yang digunakan disajikan pada tabel 2.3 sebagai acuan pelaksanaan penelitian:

Tabel 2.3 Parameter Pengelasan

Kecepatan putaran (rpm)	<i>Feeding speed</i> (mm/min)	Kedalaman pin (mm)	Sudut
<ul style="list-style-type: none"> • 1100 • 1460 • 1860 • 2920 	30	3	0°

2.15 Kerangka Penelitian



Gambar 2. 7 kerangka penelitian

2.16 Hipotesis/Pertanyaan Penulisan

Berdasarkan latar belakang dan analisis teoretis yang telah disebutkan, hipotesis penulisan ini dapat dirumuskan sebagai berikut: Hipotesis utama (H1) menyatakan bahwa perbedaan kecepatan putar (1100 rpm, 1460 rpm, 1860 rpm, dan 2920 rpm) secara signifikan memengaruhi kekerasan sambungan aluminium yang dibuat dengan prosedur Friction Stir Welding. Hipotesis kedua (H2) menyatakan bahwa perbedaan kecepatan putar secara signifikan memengaruhi kekuatan tarik sambungan AL6061 dan AL5052 yang dibuat dengan teknik *Friction Stir Welding*. Hipotesis ketiga (H3) menyatakan bahwa variasi kecepatan putar akan menghasilkan disparitas yang cukup besar pada struktur mikro sambungan aluminium.

Dengan menghasilkan hipotesis-hipotesis ini, para peneliti dapat secara sistematis menguji untuk memvalidasi atau membatalkan asumsi-asumsi ini, sehingga meningkatkan pengetahuan tentang proses FSW dan karakteristik material.