

Pengaruh Variasi Feed Rate Mikro Stir Welding (FSW) Pada Bahan Aluminium 6063

Robby Prima Hidayat¹, Viktor Naubnome², Ratna Dewi Anjani³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Singaperbangsa Karawang
Jl. HS.Ronggo Waluyo, Puseurjaya, Telukjambe Timur, Karawang, Jawa Barat 41361
E-mail: 2010631150062@student.unsika.ac.id

Abstrak

Friction stir welding (FSW) yang dikenal karena efisiensinya terhadap energi dan ramah lingkungan, cocok digunakan untuk menyambung Aluminium dan paduannya tanpa mencair. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi feed rate terhadap kekuatan tarik, sifat mekanik, tingkat kekerasan, dan struktur mikro Aluminium 6063. Dalam pengujian tarik, kekerasan (Vickers), dan analisis struktur mikro, metode eksperimen yang digunakan yaitu dengan variasi feed rate 60 mm/menit, 90 mm/menit, dan 120 mm/menit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa feed rate dapat memengaruhi secara signifikan terhadap kekuatan tarik dan kekerasan. Pada feed rate 60 mm/menit diperoleh angka kekuatan tarik tertinggi dicapai sebesar 548,008 MPa dan angka kekerasan tertinggi sebesar 81,9 HV. Feed rate 90 mm/menit menghasilkan angka kekuatan tarik tertinggi sebesar 735,283 MPa. Namun pada 120 mm/menit, angka kekuatan tarik menurun menjadi 114,194 MPa. Hasil struktur mikro juga menunjukkan variasi, nilai feed rate yang lebih tinggi menghasilkan butiran yang lebih halus pada zona yang terkena pengaruh panas (HAZ). Kesimpulannya, penyesuaian nilai feed rate penting dalam FSW untuk mencapai sifat mekanik yang optimal. Nilai feed rate yang lebih rendah menghasilkan pengelasan yang lebih baik dalam hal kekuatan tarik dan kekerasan, sementara nilai feed rate yang lebih tinggi dapat memengaruhi struktur mikro material.

Kata kunci: Mikro Friction stir welding, feed rate, kekuatan tarik

Abstract

Friction stir welding (FSW), known for its energy efficiency and environmental friendliness, is suitable for joining aluminum and its alloys without melting. This study evaluates the effect of feed rate variation on the tensile strength, mechanical properties, hardness level, and microstructure of Aluminum 6063. In tensile testing, hardness (Vickers), and microstructure analysis, the experimental method used was to vary the feed rate from 60 mm/min, 90 mm/min, and 120 mm/min. The results showed that the feed rate significantly affected tensile strength and hardness. At a feed rate of 60 mm/min, the highest tensile strength was achieved at 548.008 MPa and the highest hardness was 81.9 HV. A feed rate of 90 mm/min produced the highest tensile strength of 735.283 MPa. However, at 120 mm/min, the tensile strength decreased to 114.194 MPa. The microstructure results also showed variations, with higher feed rates producing finer grains in the heat-affected zone (HAZ). In conclusion, adjusting the feed rate is important in FSW to achieve optimal mechanical properties. Lower feed rates produce better welds in terms of tensile strength and hardness, while higher feed rates can affect the microstructure of the material.

Keywords: Micro friction stir welding, feed rate, tensile strength

1. PENDAHULUAN

Friction stir welding (FSW) adalah sebuah proses yang unggul jika dibandingkan dengan fusion welding karena lebih efisien dalam penggunaan energi, ramah lingkungan, dan serbaguna. Proses ini dilakukan guna menyatukan Aluminium dengan paduannya karena memiliki sifat dan kemampuan mengalir dengan laju deformasi yang tinggi dan bercampur tanpa meleleh. Jika diterapkan pada industri penerbangan (manufaktur pesawat terbang), proses ini masih memiliki kelemahan pada penyambungan struktur dengan bentuk yang kompleks [1]. Hal ini dikarenakan mesin las FSW hanya dapat digerakkan secara dua dimensi dan memerlukan gaya yang sangat besar selama proses

pengerjaannya. FSW menjadi salah satu jenis sambungan yang dapat dipertimbangkan karena tidak memerlukan filler pada proses penyambungannya sehingga tidak menambah bobot dari struktur. Jika dibandingkan dengan jenis las lainnya, FSW unggul dalam hal tidak menimbulkan asap, peralatan yang sederhana, dapat menyambung logam dengan weldability rendah, dan dapat menyambung dua jenis material yang berbeda. FSW juga memiliki kelemahan yaitu porositas akibat kecepatan putaran feed rate yang tidak sesuai [2].

FSW biasanya dipasang dengan robot manipulator untuk pengelasan tiga dimensi agar lebih fleksibel. Serta, gaya yang dibangkitkan harus dibuat sekecil mungkin agar cocok digunakan dengan manipulator. Penelitian ini dibuat untuk meninjau state-of-the-art terkait kemajuan dalam memahami dan mengembangkan sub-kelas FSW guna memenuhi persyaratan di atas. Utamanya, tinjauan ini berfokus pada non-rotating shoulder tool FSW, Thermal Stir Welding, Heat Assisted FSW, serta penggunaan robot manipulator dalam proses FSW [3].

Sebelumnya beberapa peneliti telah melakukan penelitian terkait teknologi las gesek FSW, di antaranya melakukan penelitian dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar indenter terhadap kualitas hasil pengelasan (kekuatan tarik, pengujian mikro dan makro). Penelitian ini menyimpulkan bahwa sambungan las gesek FSW yang baik pada dasarnya dapat dicapai dengan pengaturan parameter pengelasan yang sesuai [4]. Penelitian ini menyimpulkan bahwa hasil panas yang lebih cenderung didapatkan dari kecepatan putaran indenter (R_t) yang tinggi jika dibandingkan dengan kecepatan R_t yang lebih rendah, sehingga diperoleh hasil las yang lebih baik, sampai pada titik optimum tertentu dengan 653 rpm sebagai titik optimumnya [5].

Penelitian serupa pernah dilakukan untuk meneliti pengaruh welding rate dan kecepatan putaran terhadap kualitas pengelasan yang mendapatkan kesimpulan bahwa semakin lama welding rate maka kekuatan tarik pada pengelasan gesekan semakin menurun hingga mencapai kekuatan tarik terendah. Penelitian ini menyatakan bahwa pada saat welding rate 70 mm/min akan mendapatkan hasil uji tarik tertinggi yaitu 67,66 MPa, sedangkan pada welding rate 200 mm/min akan mendapatkan hasil uji tarik terendah yaitu 42,36 Mpa [6].

Penelitian lain juga meneliti tentang bagaimana perbedaan feed rate 24 mm/min, 42 mm/min, 55,74 mm/min, dan 98 mm/min berdampak pada kekuatan uji tarik material Aluminium. Digunakan pin silinder dengan arah putaran searah jarum jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada variasi feed rate 24 mm/min menjadi kekuatan tarik tertinggi dengan nilai rata-rata 90,57 MPa. Nilai kekerasan tertinggi pada uji kekerasan juga didapatkan pada variasi feed rate 24 mm/min. Dibandingkan dengan HAZ dan TMAZ, struktur mikro pada daerah interference zone mempunyai butiran yang lebih halus dan kecil yang terlihat pada hasil foto [7].

Penelitian lain juga meneliti pengaruh kecepatan putaran dan laju pengelasan terhadap kekuatan tarik, tingkat kekerasan, dan struktur mikro. Ketika pintool FSW bergerak lebih cepat, kekuatan tariknya meningkat. Pada saat putaran 2500 rpm dan 3600 rpm, angka kekuatan tariknya yaitu 196,67 Mpa dimana pada 3600 rpm tercapai modulus elastisitas tertinggi yang senilai 68,1 GPa. Sebaliknya, feed rate meningkat, maka kekuatan tariknya berkurang, dengan feed rate 20 mm/min sebesar 183,33 Mpa [8].

Penelitian sebelumnya menggunakan material Aluminium AA 2024-T3 dengan variasi kecepatan putar tool 900 rpm, 1500 rpm, dan 2280 rpm, kedalaman pin 3,5 mm, dan feed rate 18 mm/min. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan putar tool memengaruhi kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur mikro pada sambungan las. Kecepatan putar yang lebih tinggi cenderung meningkatkan kekuatan tarik dan kekerasan, namun peningkatan ini tidak berkelanjutan tanpa pengaturan feed rate yang tepat. Hasil optimal diperoleh pada kecepatan 1500 rpm dengan kekuatan tarik 236,93 MPa dan kekerasan 137,3 VHN. Struktur mikro menunjukkan perubahan butiran di nugget zone akibat perputaran pahat. Dalam penelitian ini, didapatkan sebuah kesimpulan. Kekuatan tarik akan dipengaruhi oleh feed rate, dimana semakin tinggi feed rate memengaruhi tinggi rendahnya kekuatan tarik spesimen. Penelitian ini menunjukkan nilai kekuatan tarik tertinggi terjadi pada variasi 90 mm

yaitu sebesar 2726,51 Mpa dan kekuatan tarik terendah terjadi pada feed rate 120 mm yaitu 2148,76 Mpa [9].

Pada struktur mikro ukuran butiran dan jumlah kandungan partikel dipengaruhi oleh seberapa tinggi feed rate. Hasil struktur mikro pada feed rate 60 lebih banyak mengandung Al₃Mg₂ yang tidak terlalu banyak dibandingkan dengan struktur yang terlihat pada feed rate 90 yang lebih banyak mengandung struktur Al₃Mg₂. Nilai kekerasan dapat dikatakan berbanding lurus dengan kekuatan tarik, perubahan parameter apapun dapat memengaruhi nilai kekerasan baik pada daerah stirzone, daerah HAZ, dan daerah basemetal. Dalam penelitian ini nilai kekerasan tertinggi terdapat pada feed rate 60 mm yang mempunyai nilai kekerasan sebesar (82.9 HV, 78.9 HV, dan 83.8 HV) dan rata-ratanya sebesar 81.9 HV. Serta, nilai kekerasan terendah berada pada feed rate 120 mm yang mencapai nilai kekerasan sebesar (73,5 HV, 82,9 HV, dan 81,8 HV) dan rata-ratanya sebesar 79,4 HV [10].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan pada tahun 2025 sampai selesai dan dilakukan dalam beberapa lokasi. Untuk mendapatkan hasil las, penelitian dilakukan di institut sains dan teknologi akprid (yogyakarta). Pengujian kekerasan dan pengujian tarik dengan standar ASTM E8 dilakukan di PT. Intec instruments. Pengujian struktur mikro dilakukan di PT. Techno metal industry.

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah Metode Eksperimen. Persiapan pembuatan spesimen yang telah ditentukan, melakukan proses friction stir welding, pembuatan spesimen pengujian sesuai standar ASTM yang telah ditentukan, sampai dengan proses pengujian hasil friction stir welding.

Penelitian ini dibuat 3 variasi untuk tiap parameter dengan pengujian yang dilakukan yaitu pengujian tarik, kekerasan dan struktur mikro. Pada parameter kecepatan putar variasi yang digunakan yaitu 910 rpm, 1500 rpm, dan 2280 rpm. Pada parameter rotating tool variasi yang digunakan yaitu 3 mm, 4mm, dan 4,8 mm.

2.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan selama proses penelitian sebagai berikut:

- Mesin vertikal dan perlengkapannya
- Mesin las gesek (friction stir welding)
- Alat penguji tarik, penguji kekerasan, pengujian struktur mikro
- Mesin gergaji
- ATK (Penggaris, spidol)
- APD

Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut:

- Aluminium 6063 ukuran 25x50x1 mm

2.2 Spesifikasi Bahan Uji

Tabel 1. Komposisi Kimia Aluminium 6063

Unsur	%	Unsur	%
Si	0.1949	Zn	0.0115
Fe	0.3577	Ti	0.0145
Cu	0.0658	Ca	0.0032

Mn	0.0843	P	0.0002
Mg	4.0468	Pb	0.0012
Cr	0.1971	Sb	0.0002
Ni	0.0050	Sn	0.0022
		Al	95.87

2. 3 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa tahapan metode penelitian dari mulai persiapan pembuatan spesimen, proses friction stir welding, pembuatan spesimen pengujian sampai dengan proses pengujian hasil friction stir welding.

A. Persiapan Spesimen

Pembuatan spesimen merupakan langkah awal dalam penelitian ini. Tahap dalam persiapan spesimen yaitu pemilihan material yang akan digunakan adalah Alumunium berbentuk pelat dengan tebal 1 mm sebanyak 3 buah dengan ukuran 25 x 50 mm.

B. Proses Pengelasan

Proses pengelasan gesek dilakukan pada spesimen yang telah dibentuk mendekati spesimen untuk uji tarik, uji kekerasan dan struktur mikro. Adapun proses pengelasan gesek adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan mesin frais atau milling dalam posisi vertikal.



Gambar 1. Mesin milling

2. Memasang friction tool pada pencekam yang ada pada mesin milling.



Gambar 2. Memasang friction tool

3. Menyiapkan cakram benda kerja spesimen yang akan di sambung.



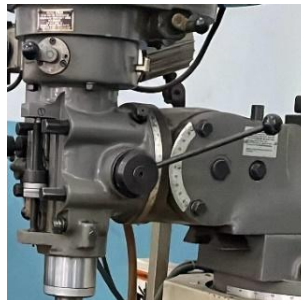
Gambar 3. Cekam

4. Memasang spesimen yang akan di las



Gambar 4. Spesimen proses las

5. Seting mesin fraction stir welding.



Gambar 5. Setting Mesin FSW

6. Jalankan proses penyambungan dengan menggerakan rotasi dan akan menghasilkan panas melalui gesekan dan akan menempelkan spesimen benda kerja.



Gambar 6. Proses Penyambungan spesimen benda kerja

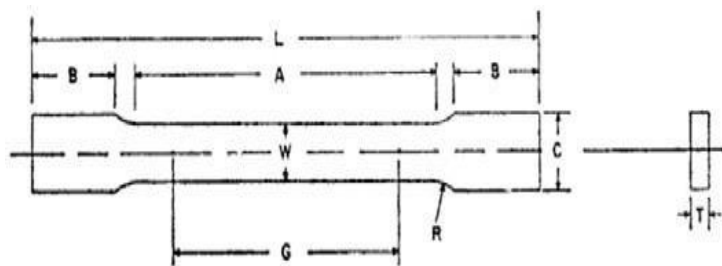
7. Setelah semua spesimen telah di las, alat akan di matikan dan proses selesai



Gambar 7. Hasil akhir spesimen

C. Prosedur Pengujian Tarik

Setelah pengelasan benda kerja yang pada awalnya berbentuk persegi panjang akan dipotong sesuai dengan standarketika hendak melakukan pengujian tarik. Hal ini bertujuan untuk memusatkan terjadinya patahan agar tertuju pada sambungan las sehingga dapat mengetahui besar kekuatan tariknya. Benda kerja yang menggunakan Alumunium 6063 dengan tebal 1 mm dibentuk dan disesuaikan dengan standar ASTM E8.



Gambar 8. Skema Standar ASTM E8



Gambar 9. Spesimen uji tarik sebelum menjadi standar ASTM E8



Gambar 9. Spesimen uji tarik sesudah menjadi standar ASTM E8

Adapun langkah–langkah pengujian tarik adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan spesimen.
2. Menghidupkan *control power*, *hydraulic power*, dan *servomotor*.
3. Menentukan data dan dimensi spesimen pada lembarkerja,
4. Mengatur posisi ragum yang adadialat uji tarik.
5. Benda kerja dijepit pada ragum yang ada pada alat uji tarik
6. Melakukan *setting* beban dan pencatat grafik pada mesin tarik. Berikan beban

secara *continue* sampai spesimen patah.

7. Mencatat gaya maksimum yang dapat ditahan oleh benda kerja dan menghitung kekuatan tarik pada data yang menggunakan persamaan perhitungan
8. Hasil pengujian pada lembar kertas pada *roller* dan penghitungan manual.
9. Setelah pengujian selesai, semua *power* dimatikan secara berurutan.

D. Prosedur Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan yang lakukan menggunakan metode Vickers. Pengujian ini dilakukan pada permukaan material dari daerah logam induk, HAZ dan daerah las. Langkah-langkah pengujian kekerasan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan Spesimen yang telah dipoles sampai halus pada bagian yang akan dicek.
2. Memasang yang akan digunakan pada mesin vickers hardness tester, indenter yang digunakan pada pengujian yaitu indenter intan yang berbentuk piramid.
3. Meletakan material yang akan diuji diatas ragum agar permukaan benda uji tegak lurus terhadap indenter sumbu.
4. Atur ketinggian meja uji dan sesuaikan tingkat fokus antara mikroskop dengan benda uji.
5. Tekan tombol start maka indenter akan turun secara perlahan.
6. Perhatikan monitor yang akan memperlihatkan nilai gaya penekanan yang terus meningkat hingga mencapai batas gaya yang telah ditentukan sebelumnya.
7. Setelah itu ukur pada wilayah yang diberi penekanan tadi.
8. Kemudian perbesar tampilan layar menggunakan tombol control pembesar pada mesin vicker hardness tester untuk mengukur sudut lekukan dengan membuat garis sehingga ukuran Panjang diagonalnya bisa ditentukan dengan mudah.
9. Hasil pengukuran vickers hardness akan terhitung secara otomatis menggunakan software yang ada didalamnya.

E. Prosedur Pengujain Struktur Mikro

Proses pengujian struktur mikro ini dilakukan menggunakan alat mickrohardness dengan model FM- ARS9000, pada daerah HAZ dengan tahapan proses pengujian sebagai berikut:

1. Cutting (Pemotongan), Proses pemotongan yang dilakukan untuk menganalisis struktur mikro.
2. Mounting (Alat Bantu Ples), Proses ini dilakukan untuk penghalusan pada permukaan spesimen agar tidak terdapat goresan.
3. Polishing (Pemolesan), Polishing dilakukan untuk memperhalus baja sampai seperti kaca.
4. Cutting (Pemotongan), Etching merupakan proses yang sangat penting dilakukan karena akan memunculkan struktur mikro pada material dengan menggunakan cairan etsa dengan kandungan etsa HNO₃ sekitar 3% dan alkohol 97%.

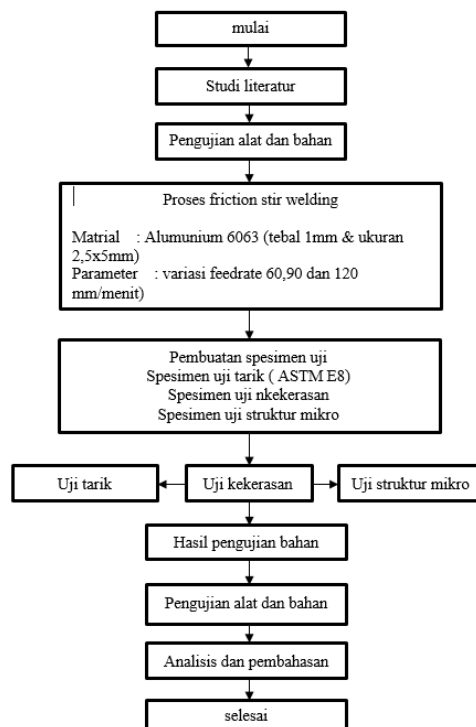
Proses selanjutnya yang dilakukan adalah pengujian struktur mikro dengan langkah-

langkah sebagai berikut:

1. Menyalakan mikroskop dengan menekan ON pada switch.
2. Meletakkan Spesimen pada stage/area pengamatan.
3. Pilih cahaya yang sesuai dengan mengatur light intensity control knop.
4. Pilih pembesaran lensa objektif dengan mengatur revolving nose piece.
5. Setting fokus lensa dan kamera dengan cara mengatur fine focusing control.
6. Fokuskan gambar, lalu pilih lokasi yang akan diinginkan dengan mengatur stage drive control knop.

Tekan capture pada soft ware jika ingin menyimpan gambar. Hasil pengamatan tersebut dapat dilakukan analisis struktur mikro yang terdapat pada sampel penguji.

2. 4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 10. Diagram Alir (Flowchart)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Temperatur Pengelasan

Temperatur pada saat proses pengelasan *Friction stir welding* dipengaruhi oleh kecepatan rotasi dan *feed rate*. Setiap titik akan berbeda nilainya dikarenakan tidak sama bagian pada material terkena gaya gesek dari proses pengelasan *Friction stir welding* tersebut, berikut data temperatur pada saat proses pengelasan:

Seiring dengan peningkatan temperatur, baik temperatur tertinggi maupun temperatur akhir mengalami peningkatan. Ini menunjukkan adanya proses pengaturan temperatur yang sistematis dan bertahap. Peningkatan temperatur dari awal ke puncak menunjukkan tren peningkatan yang konstan, mengindikasikan kebutuhan pemanasan yang lebih tinggi untuk temperatur yang lebih besar. Penurunan temperatur dari puncak ke akhir relatif konsisten (sekitar 50-60°C), menunjukkan mekanisme atau proses pendinginan yang serupa di semua entri.

Tabel 2. Hasil Temperatur

No.	Suhu Awal	Suhu Tertinggi	Suhu Akhir
60	36°C	180°C	120°C
90	36°C	230°C	140°C
120	36°C	260°C	160°C

3.2 Pengujian Tarik

Pengujian Tarik dilakukan dengan tiga spesimen uji yang terdiri dari 3 variasi *feed rate*. Hasil perhitungan tiap sampel parameter keseluruhan dari uji Tarik pada Aluminium 6063 ditunjukkan pada tabel berikut:

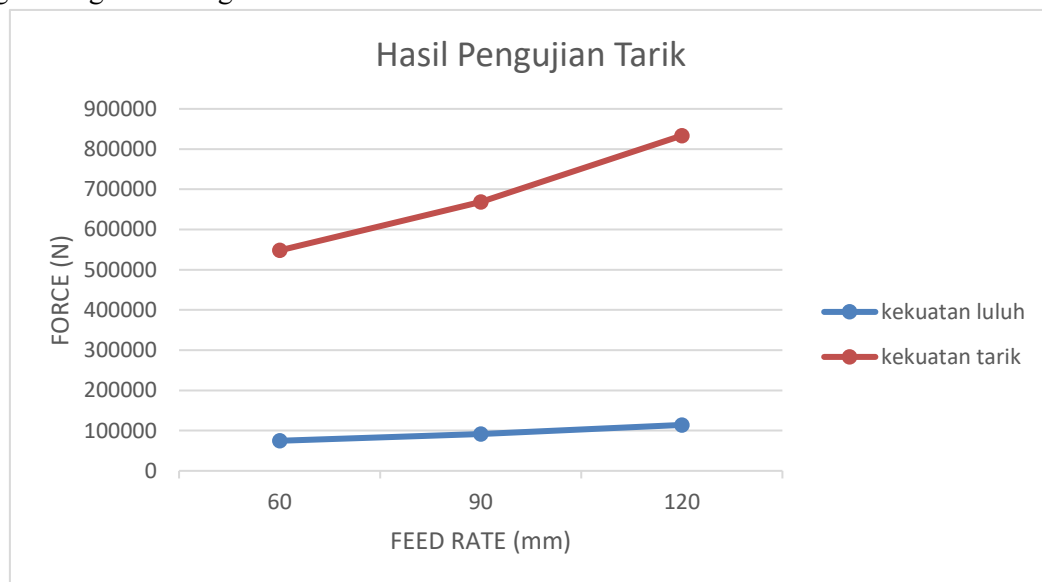
Tabel 3. Hasil Perhitungan sampel uji

Sampel Uji	Perhitungan	Hasil perhitungan
	Kekuatan luluh	$\sigma = \frac{f}{A_0} = \frac{3641,34 \text{ N}}{625 \text{ mm}^2} = 87,876 \text{ N/mm}^2$
60	Kekuatan Tarik	$\sigma = \frac{f}{A_0} = \frac{6986,56 \text{ N}}{625 \text{ mm}^2} = 91,74 \text{ N/mm}^2$
	Regangan	$\varepsilon = \frac{L - L_0}{A_0} \times 100\% = \frac{52,19 - 50}{50} \times 100\% = 4,38\%$
	Kekuatan luluh	$\sigma = \frac{f}{A_0} = \frac{5697,63 \text{ N}}{625 \text{ mm}^2} = 91,574 \text{ N/mm}^2$
90	Kekuatan Tarik	$\sigma = \frac{f}{A_0} = \frac{7131,34 \text{ N}}{625 \text{ mm}^2} = 2726,51 \text{ N/mm}^2$
	Regangan	$\varepsilon = \frac{L - L_0}{A_0} \times 100\% = \frac{51,80 - 50}{50} \times 100\% = 3,60\%$
	Kekuatan luluh	$\sigma = \frac{f}{A_0} = \frac{4738,32 \text{ N}}{625 \text{ mm}^2} = 101,408 \text{ N/mm}^2$
120	Kekuatan Tarik	$\sigma = \frac{f}{A_0} = \frac{7643,34 \text{ N}}{625 \text{ mm}^2} = 2148,76 \text{ N/mm}^2$
	Regangan	$\varepsilon = \frac{L - L_0}{A_0} \times 100\% = \frac{51,10 - 50}{50} \times 100\% = 2,20\%$

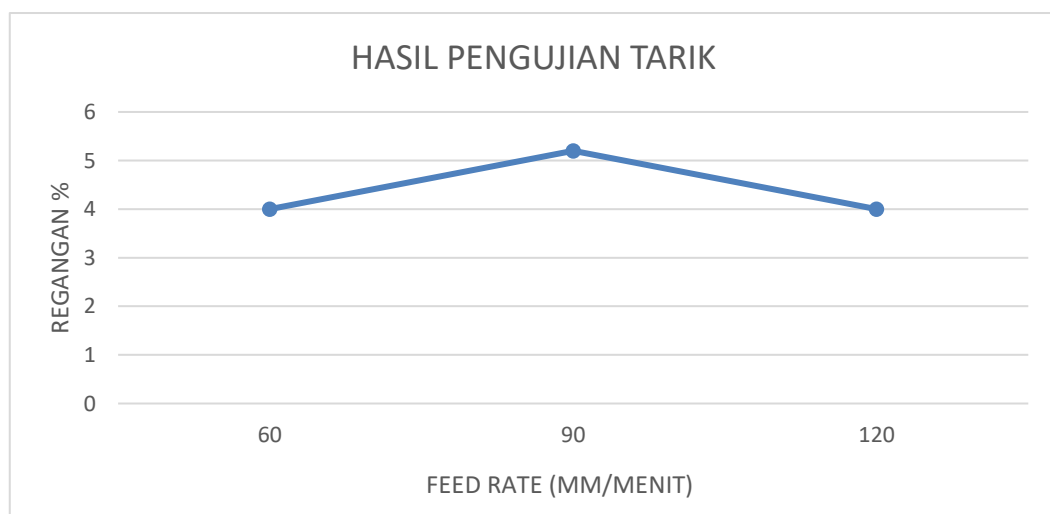
Tabel 4. Hasil pengujian tarik

No.	Sampel uji	Beban Luluh (N)	Beban Max. (N)	Kekuatan Luluh (N/mm^2)	Kekuatan Tarik (N/mm^2)
1	60	48,0818	6,58655	300,004	37,5124
2	90	460,600	63,0959	1351,73	31,7760
3	120	833,613	114,194	735,283	29,6724

Merupakan hasil pengujian Tarik dari proses pengelasan FSW terhadap Aluminium 6063. Berikut hasil pengujian Tarik untuk variasi *feed rate* dengan kecepatan tetap 120 rpm terdapat pada gambar grafik sebagai berikut:



Gambar 11. Hasil perbandingan pengujian gaya dengan *feed rate*



Gambar 12. Hasil perbandingan pengujian regangan dengan *feed rate*



Gambar 13. Hasil pengujian spesimen

Hasil pengujian tarik yang dilakukan pada spesimen dengan variasi parameter *feed rate* 60 mm menunjukkan kekuatan tarik sebesar 2583.60 MPa, kekuatan luluh 87.876 MPa, dan regangan sebesar 4.38%. Kekuatan tarik spesimen dengan variasi parameter *feed rate* 90 mm ditemukan sebesar 2726,51 MPa, dengan kekuatan luluh 91,574 MPa dan regangan 3,60%. Variasi *feed rate* 120 mm menunjukkan kekuatan tarik sebesar 2148,76 MPa, kekuatan luluh sebesar 101,408 MPa, dan regangan sebesar 2,20%. Data yang diperoleh dari pengujian tarik menunjukkan perbedaan kekuatan tarik antara setiap variasi parameter. Spesimen dengan *feed rate* 90 mm menunjukkan kekuatan tarik tertinggi (2726.51 MPa), sedangkan kekuatan tarik terendah teramati pada spesimen dengan *feed rate* 120 mm (2148.76 MPa).

Temperatur pengelasan dan lamanya proses pengadukan selama proses pengelasan adalah beberapa faktor yang memengaruhi kekuatan tarik pada setiap tingkat pengadukan. Hasil kekuatan tarik rata-rata terendah disebabkan oleh berkurangnya penetrasi *tool* ke dalam material selama proses pengelasan, yang disebabkan oleh panjang *tool* yang lebih pendek selama proses ini. Hal ini mengakibatkan aksi pengadukan tidak mencapai bagian bawah material. Kekuatan tarik rata-rata tertinggi dicapai pada *feed rate* tertinggi, karena penetrasi alat yang cukup dan temperatur pengelasan yang sesuai, yang memungkinkan pengadukan yang optimal. Kekuatan tarik rata-rata *feed rate* berada di tengah-tengah karena penetrasi *tool* cukup dalam, tetapi *feed rate* lebih cepat, sehingga temperatur pengelasan menurun dan permukaan menjadi lebih cepat dingin, menyebabkan cacat dan penurunan kekuatan tarik. Hal ini sesuai dengan temuan D. Prasetyana (2016).

Jika dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Petrus Heru Sudargo,

Bambang Margono, Edy Suryono, dan Ivan Ardiyanto Arsita, hasil penelitian ini menunjukkan kekuatan tarik yang lebih tinggi, yaitu rata-rata 2726,51 MPa. Pada tahun 2021, kekuatan tarik mencapai 219,32 MPa, yang disebabkan oleh tidak adanya cacat lubang cacing pada logam las.

3.3 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan material Aluminium 6063 diperoleh hasilnya yaitu pengujian kekerasan dilaksanakan menggunakan metode *Vickers* dengan beban 200 gf. pada daerah *weld metal* (sambungan las), daerah *heat-affected zone* (HAZ), dan *base metal* (logam dasar). Ini berlaku untuk yang mengalami atau tidak mengalami proses perlakuan panas. Gambar 4.4 berikut ini mengilustrasikan daerah logam las dan logam dasar dari benda uji.



Gambar 14. Hasil pengujian spesimen kekerasan

Perlu dicatat bahwa proses pengujian dilakukan pada tiga spesimen yang berbeda, dengan tiga area pengujian yang berbeda. Berikut hasil perhitungan dari uji kekerassan pada Aluminium 6061 dan disajikan dalam bentuk tabel di bawah ini:

Tabel 5. Hasil pengujian kekerasan

No	Sampel uji	Titik	<i>Hardness of Vickers</i> (HV)	<i>Avarage of HV</i>
1	60	1	66,5	68,3
		2		
		3	73,2	
			65,1	

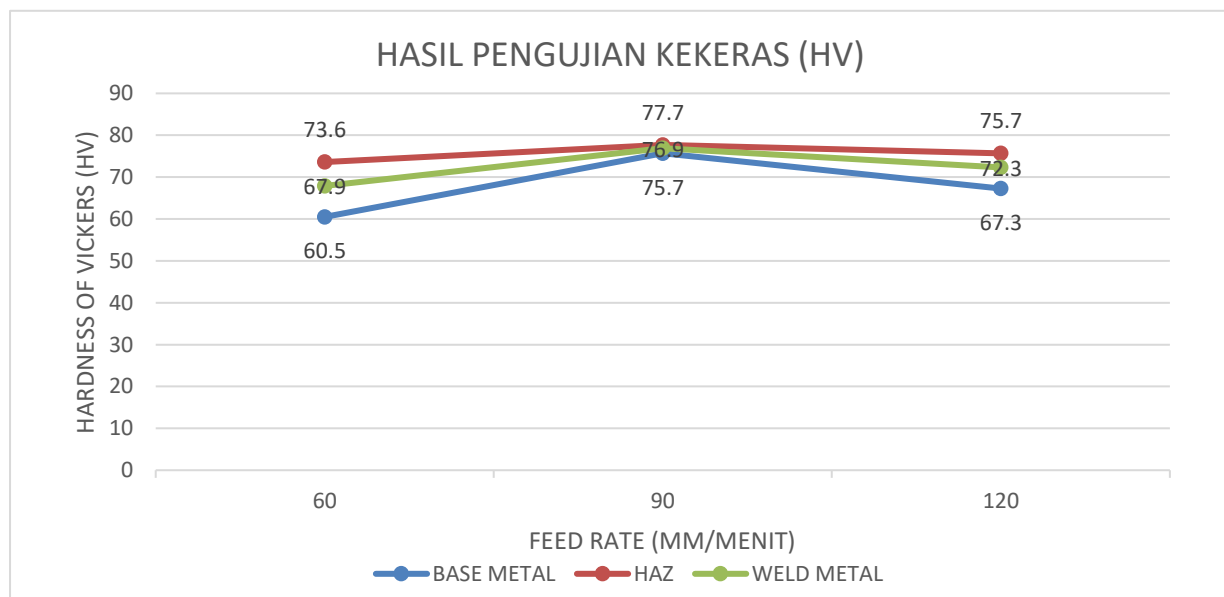
2	90	1	75,7	77,4
		2		
		3	82,1	
			74,3	
3	120	1	67,3	71,3
		2		
		3	75,7	
			70,8	

Keterangan:

1 = HAZ

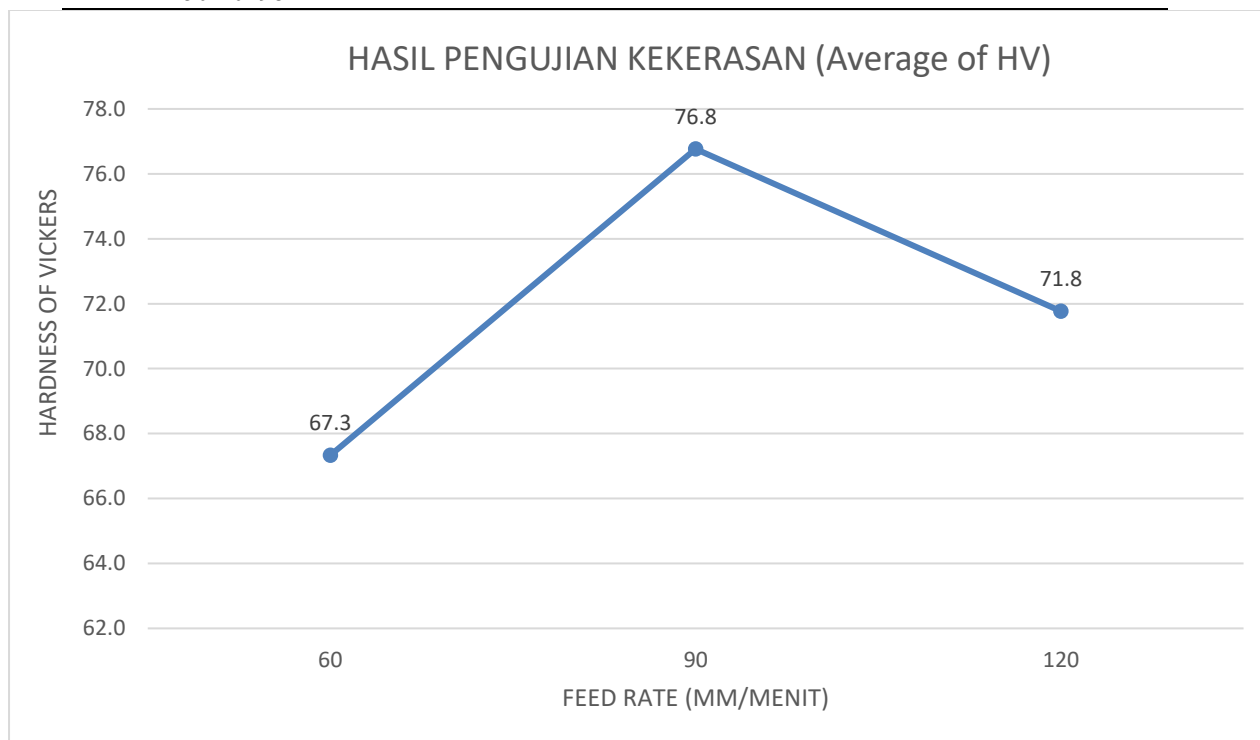
2 = *Stir Zone*

3 = HAZ



Gambar 15 Hasil perbandingan kekerasan dengan *feed rate*

Hasil pengujian kekerasan yang dilakukan selama proses pengelasan *Friction stir welding* terhadap Aluminium 6061 disajikan dalam gambar 15.



Gambar 16. Hasil perbandingan kekerasan dengan *feed rate*

Hasil uji kekerasan yang dilakukan pada Aluminium 6061 dengan parameter *feed rate* 60 mm, disajikan dalam tabel berikut. Nilai HV rata-rata untuk parameter ini adalah 81,9, dengan nilai individual 82,9 HV, 78,9 HV, dan 83,8 HV. Parameter *feed rate* 90 mm menunjukkan nilai kekerasan (79,9 HV, 81,8 HV, dan 80,5 HV), dengan HV rata-rata 80,73. Parameter *feed rate* 120 mm menunjukkan nilai kekerasan sebesar (73,5 HV, 82,9 HV, dan 81,8 HV), dengan rata-rata HV sebesar 79,4 HV. Sama halnya dengan uji tarik, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi setiap parameter dapat memengaruhi nilai kekerasan pada daerah pengelasan, daerah HAZ, dan *base metal*.

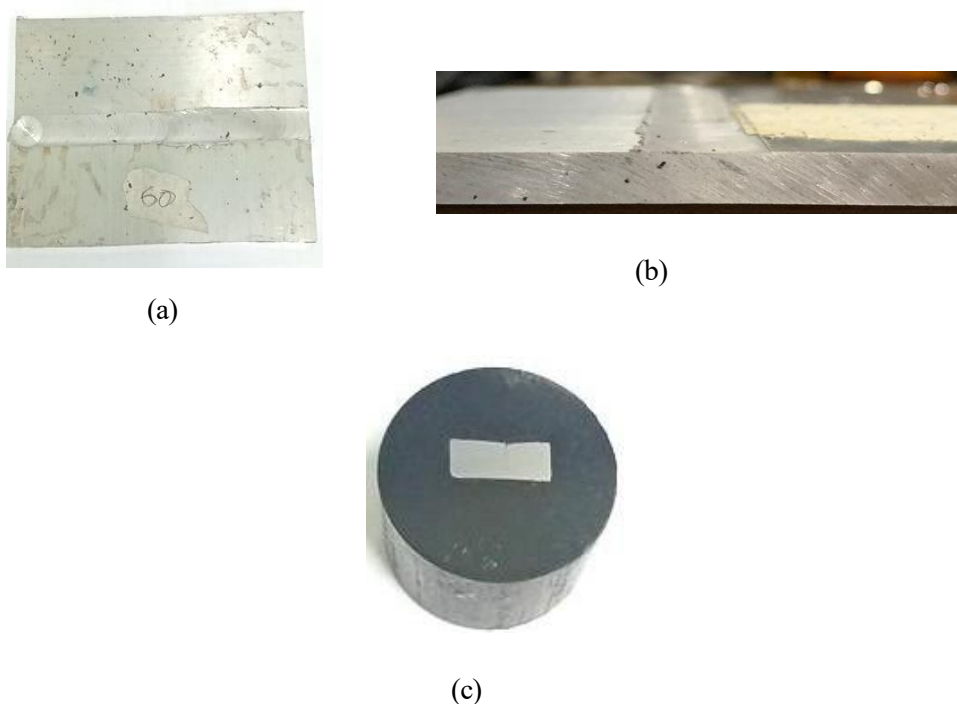
Efek dari variasi *feed rate* pada logam dasar Fe dan Aluminium hampir sama. Nilai kekerasan dari bongkahan las menunjukkan variasi yang cukup besar. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan pembentukan material *intermetallic compound* (IMC) yang dihasilkan dari pencampuran partikel Aluminium dan besi, yang terjadi karena campuran *tool*. Hal ini mengakibatkan bongkahan las menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi daripada logam dasar Aluminium. Nilai kekerasan yang meningkat disebabkan oleh senyawa IMC yang terbentuk sebagai konsekuensi dari campuran *tool* yang lebih optimal, yang pada gilirannya menimbulkan permukaan *nugget* las yang menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa tidak ada logam tambahan yang dimasukkan selama proses pengelasan. Pada pengelasan busur, penggabungan logam baru (elektroda) dapat disesuaikan untuk menyelaraskan dengan sifat mekanik yang diinginkan. Dalam *Friction stir welding* (FSW), penyambungan logam dicapai melalui penerapan gaya gesekan dan pencampuran, tanpa memasukkan logam tambahan di antara material. Kekuatan zona yang terpengaruh panas (HAZ) biasanya dibatasi oleh kekuatan logam dasar. Salah satu kelemahan dari proses ini adalah pelunakan pada area las yang terjadi akibat panas yang

dihasilkan. Pengurangan kekerasan yang diamati di area pengelasan disebabkan oleh karakteristik yang melekat pada paduan dan ketidakmampuan proses pengelasan untuk memfasilitasi pengerasan. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh D. Prasetyana (2016).

Pada kekuatan kekerasan, hasil penelitian kali ini lebih besar yaitu sebesar 81,9 HV dibanding penelitian yang telah dilakukan Tarmizi, Riki Indrawan, Irfan. 2019. sebesar 71,92 HV, Hal ini terjadi karena penggunaan prosedur pengujian *indentor* yang salah atau penggunaan pengujian kekerasan yang tidak sesuai dengan prosedur yang disarankan.

3.4 Pengujian Struktur Mikro

Pengujian mikro yang dilakukan di PT. Techno Metal Industry mencapai hasil yang bervariasi untuk *Heat Affecting Zone* (HAZ), yang dapat dilihat pada gambar 4.7 berikut ini.

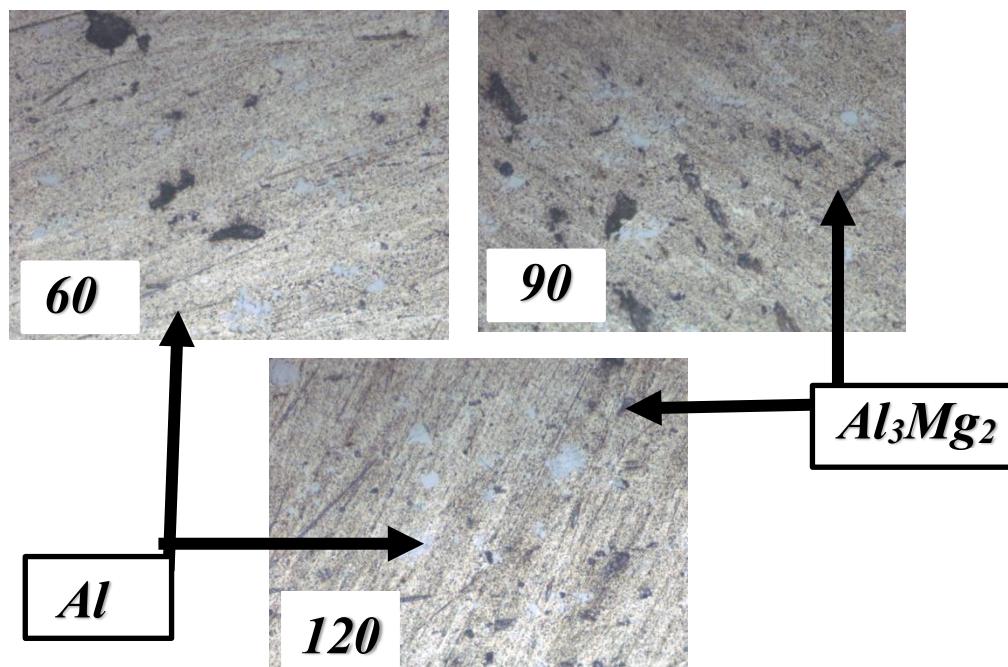


Gambar 17. (a) sampel sebelum diuji (b) titik pengujian (c) hasil pengujian

Pengujian yang dilakukan menggunakan mikroskop dengan pembesaran yang dipakai yaitu $\times 500$, berikut adalah gambar dari hasil pengujian. Pada saat proses pengelasan dengan perbedaan variasi parameter, temperatur temperatur tidak diukur sehingga tidak diketahui temperatur temperatur maksimal pada saat pengelasan. Tetapi setelah Analisa menggunakan diagram fasa Al-Cr, Al-Fe dan Al-Mn (dapat dilihat diagram fasa Al pada lampiran), hanya fasa Al_3Mg_2 yang mungkin ada setelah terjadi pendinginan dari temperatur maksimal pengelasan FSW ke temperatur ruangan. Fasa-fasa intermetallic Al-Cr, Al-Fe dan Al-Mn tidak terbentuk karena kelenturan kandungan Cr, Fe, dan Mn dalam Al tidak terlampaui.

Pada pengujian struktur mikro seharusnya dilakukan pada 5 titik yaitu 2 titik pada daerah *base metal*, 2 titik pada daerah HAZ dan 1 titik pada daerah *weld metal* agar dapat melihat perubahan butiran yang terjadi pada setiap titik. Akan tetapi pada pengujian kali ini

hanya melakukan pada daerah HAZ sehingga tidak dapat melihat dengan jelas seberapa besar perubahan butiran yang terjadi setelah pengelasan FSW.



Gambar 18. Hasil Struktur mikro

Pada gambar diatas terjadi perbedaan struktur mikro. Butiran Al_3Mg_2 bersifat lebih keras. Menurut *ASM Handbook Vol 9. Metallography and Microstructures*, Aluminium seri 6XXX memiliki fasa yang dapat dilihat dengan pengamatan mikro yaitu fase Al_3Mg_2 dan Al murni. Fase yang paling mudah terlihat adalah Al_3Mg_2 mulai terlihat berubah warna dan terdispersi pada matrik Aluminium yang berwarna putih. Pergesekan yang menimbulkan panas pada saat pengelasan dapat mengubah struktur mikro spesimen, dimana perubahan struktur mikro terjadi pada daerah HAZ. Daerah ini memiliki butir lebih kasar karena base metal menerima panas. Hasil struktur mikro pada *feed rate* 60 lebih banyak mengandung Al murni.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kekuatan Tarik akan dipengaruhi pada feed rate, dimana semakin tinggi feed rate memengaruhi tinggi rendahnya tarik sepesimen. Pada penelitian kali ini nilai tarik yang paling tinggi terjadi pada variasi 90 mm memiliki kekuatan Tarik paling tinggi yaitu 114,194 MPa dan kekuatan Tarik paling rendah terjadi pada feed rate 120 mm yaitu 735,283MPa
2. Pada struktur mikro, besar kecilnya butiran serta banyak sedikitnya kandungan partikel dipengaruhi seberapa tinggi nya feed rate. Pada penelitian ini hasil struktur mikro pada feed rate 60 lebih banyak mengandung Al murni dan tidak terlalu terdapat banyak struktur Al_3Mg_2 , dibandingkan struktur yang terlihat pada feed rate 90 yang lebih banyak mengandung struktur Al_3Mg_2 .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Azwinur, S. A. Jalil, and A. Husna, "Pengaruh variasi arus pengelasan terhadap sifat mekanik pada proses pengelasan SMAW," J. POLIMESIN, vol. 15, no. 2, p. 36, 2017,
- [2] B. L. Sanyoto, N. Husodo, S. Bangun, and S. Mahirul, "Penerapan Teknologi Las Gesek (Friction Welding) Dalam Proses Penyambungan Dua Buah Pipa Logam Baja Karbon Rendah," J. Energi dan Manufaktur, vol. 5, no. Oktober, pp. 51–60, 2012.
- [3] M. B. Waluyo and V. D. Waas, "Pengaruh Laju Pengelasan Terhadap Kekuatan Tarik Pengelasan Friction stir welding Material Aluminium," J. Tek. Mesin, Elektro, Inform. Kelaut. dan Sains, vol. 2, no. 1, pp. 51–55, 2022,
- [4] D. Mulyani and H. Herawati, "Pengaruh Teknik pengumpulan data terhadap hasil uji," UNEJ e-Proceeding, pp. 463–482, 2016.
- [5] Arif Rahman and S. Perdana, "ANALISIS PRODUKTIVITAS MESIN PERCETAKAN PERFECT BINDING DENGAN METODE OEE DAN FMEA Arif Rahman dan Surya Perdana," J. Ilm. Tek. Ind., vol. 7, no. 1, pp. 34–42, 2019.
- [6] F. Nugroho, N. Ahmadi, E. Yulianto, P. Studi, T. Mesin, and F. T. Kedirgantaraan, "STUDI PENGARUH KECEPATAN PUTARAN ROTATING TOOL FRICTION STIR WELDING (FSW) TERHADAP KEKUATAN , KEKERASAN DAN STRUKTUR," vol. M, no. 1, pp. 24– 28, 2024.
- [7] D. Prasetyo Koesgi, Sehonon, and D. Wicaksono, "Pengaruh Pemanasan Awal Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Spot Friction stir welding Dalam Pemasangan Rivet Aluminium 2024," Tek. STTKD J. Tek. Elektron. Engine, vol. 7, no. 1, pp. 140–153, 2021,
- [8] A. Widyianto et al., "KARAKTERISASI KUALITAS LASAN PADA BAHAN SERUPA AZ31B DENGAN PROSES MICRO-FRICTION STIR SPOT WELDING (μ FSSW)," vol. 5, pp. 101–118, 2023.
- [9] P. Pujono, D. Prabowo, I. Kurniawan, J. S. Pribadi, and M. Yusuf, "Laju perambatan retak fatik dan sifat mekanik pada pengelasan Friction stir welding (FSW) aluminium AA2024-T3 dengan perlakuan transient thermal tensioning (TTT)," Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin, vol. 11, no. 2, pp. 293– 300, 2022,
- [10] J. Artikel, "JURNAL KAJIAN TEKNIK MESIN Vol 6 No1," J. Kaji. Tek. Mesin, vol. 06, no. 1, pp. 1–11, 2021,
- [11] A. Heidarzadeh et al., "Friction stir welding/processing of metals and alloys: A comprehensive review on microstructural evolution," Prog. Mater. Sci., vol. 117, no. March 2019, p. 100752, 2021,
- [12] M. Hariz, D. Sayogi, M. N. Sasongko, T. Mesin, and U. Brawijaya, "Analisis Temperatur Retreating Side dan Advancing Side Sambungan Las Friction stir welding AA 6061 Pada Perbedaan Suhu Awal," vol. 2, no. April, pp. 633–639, 2023.
- [13] P. Aluminium, T. Sejenis, D. Al, and D. A. N. Al, "3762 _ Artikel _ JMachine _ S4 _ Deo _ Irza _ dk 3418 Words 20457 Characters 7 Pages Oct 23 , 2022 8 : 35 AM GMT + 7 Oct 23 , 2022 8 : 35 AM GMT + 7 18 %
Overall Similarity The combined total of all matches , including overlapping sources , for each datab," 2022.
- [14] H. Purwanto et al., "Evaluasi Laju Pengelasan terhadap Mikrostruktur Sambungan Aluminium 5052 dengan Menggunakan Metode Friction stir welding," vol. 6, no. 2, pp.

- 1–7, 2022.
- [15] M. Ikhsan, “ANALISIS PENGUJIAN TARIK PADA PENYAMBUNGAN ALUMINIUM-TEMBAGA dengan PROSES FRICTION,” vol. 12, no. 1, pp. 75–81, 2022.
-