

# Pengaruh Feed Rate Terhadap Uji Kekerasan, Uji Tarik dan Mikro Struktur Pada Alumunium 6061 dengan Metode Friction Stir Welding

Daffa Aulian Rahmat<sup>1\*</sup>, Viktor Naubnome<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang Indonesia

\*Koresponden email: daffaaulian25@gmail.com

Diterima: 23 Juni 2024

Disetujui: 8 Juli 2024

## Abstract

This research investigates the effect of feed rate on the mechanical and structural properties of friction stir welding (FSW) of aluminium 6061. This method is important because FSW is an environmentally friendly and energy efficient welding technique for applications on aluminium materials and its alloys. The feed rates used are 60 mm/min, 90 mm/min and 120 mm/min. Hardness, tensile and microstructure tests are carried out to understand how feed rate affects material properties. The hardness value of the material also shows a trend that is in line with the tensile strength, with variations in the feed rate parameter having a significant effect on the hardness in the weld metal area, the heat affected zone (HAZ) and the base metal.

**Keywords:** *feed rate, friction stir welding (FSW), aluminium hardness testing, tensile testing*

## Abstrak

Penelitian ini menginvestigasi pengaruh feed rate terhadap sifat-sifat mekanis dan struktural pada proses Friction Stir Welding (FSW) dari Alumunium 6061. Metode ini penting karena FSW merupakan teknik pengelasan yang ramah lingkungan dan efisien energi untuk aplikasi pada material aluminium dan paduannya. Variasi feed rate yang digunakan adalah 60 mm/min, 90 mm/min, dan 120 mm/min. Pengujian dilakukan terhadap kekerasan, uji tarik, dan struktur mikro untuk memahami bagaimana feed rate mempengaruhi karakteristik material. Nilai kekerasan material juga menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan kekuatan tarik, dengan variasi pada parameter feed rate memberikan efek yang nyata terhadap kekerasan pada daerah weld metal, heat affected zone (HAZ), dan base metal.

**Kata Kunci:** *feed rate, friction stir welding (FSW), uji kekerasan aluminium, uji tarik*

## 1. Pendahuluan

*Friction Stir Welding (FSW)* merupakan sebuah proses yang menawarkan keunggulan dalam efisiensi energi, ramah terhadap lingkungan, dan sifat yang serbaguna dibandingkan dengan *fusion welding*. Proses ini terutama digunakan untuk menyambung aluminium dan paduannya karena logam ini memiliki karakteristik mampu mengalir pada laju regangan yang tinggi dan bercampur dalam keadaan tidak meleleh [1].

Salah satu jenis sambungan yang dapat dipertimbangkan adalah *Friction Stir Welding (FSW)* karena las jenis ini tidak memerlukan filler untuk proses penyambungannya sehingga tidak menambah bobot dari struktur. Selain itu, *FSW* memiliki beberapa keunggulan yang tidak dimiliki oleh jenis las lainnya, yaitu tidak menimbulkan asap, menggunakan peralatan yang sederhana, mampu menyambung logam dengan weldability rendah, dan dapat menyambung dua jenis material yang berbeda [2].

*FSW* biasanya dipasangkan dengan robot manipulator sehingga mampu mengelas dalam tiga dimensi. Agar cocok digunakan di manipulator, maka perlu diusahakan agar gaya yang dibangkitkan selama proses menjadi sekecil mungkin. Penelitian ini berusaha untuk mengulas tentang *state-of-the-art* dalam pemahaman dan pengertian terhadap pengembangan *sub-klas FSW* untuk memenuhi persyaratan tersebut. Ulasan terutama difokuskan terhadap *non-rotating shoulder tool FSW, Thermal Stir Welding*, serta *Heat Assisted FSW*, dan penggunaan robot manipulator dalam proses *FSW* [3].

Sebelumnya telah dilakukan penelitian oleh beberapa peneliti yang berkaitan dengan teknologi pengelasan gesek (*Friction Stir Welding*). Salah satu penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh kecepatan putar indenter terhadap kualitas hasil pengelasan, termasuk kekuatan tarik, serta pengujian mikro dan makro [4]. Penelitian ini menunjukkan bahwa pada laju pengelasan 70 mm/min, kekuatan tarik yang diperoleh adalah yang tertinggi, yaitu sebesar 67,66 MPa. Sebaliknya, pada laju pengelasan 200 mm/min, kekuatan tarik yang diperoleh adalah yang terendah, yaitu sebesar 42,36 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa pengaturan laju pengelasan yang tepat sangat penting untuk mencapai

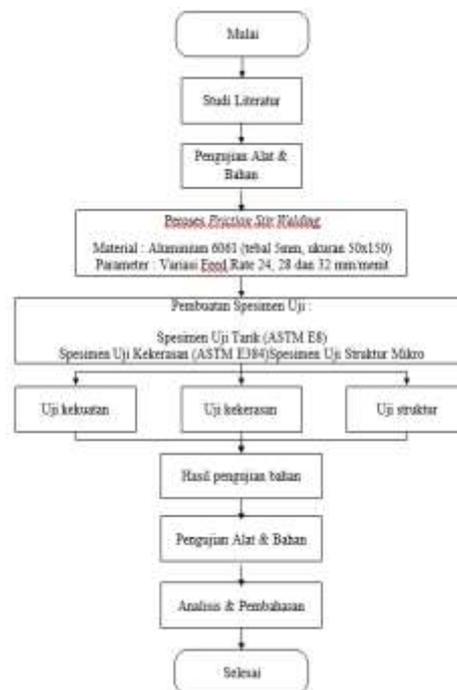
kualitas pengelasan yang optimal, dengan laju pengelasan yang lebih lambat menghasilkan sambungan yang lebih kuat hingga titik tertentu.

Pada penelitian lain, dilakukan penelitian mengenai pengaruh variasi *feed rate* terhadap kekuatan uji tarik dengan menggunakan aluminium sebagai materialnya. *Feed rate* yang diuji adalah 24 mm/min, 42 mm/min, 55 mm/min, 74 mm/min, dan 98 mm/min, menggunakan pin berbentuk silinder dengan arah putaran searah jarum jam (*clockwise*) [5]. Pengaruh kecepatan rotasi dan kecepatan laju pengelasan terhadap kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur mikro juga diteliti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin cepat putaran pin *tool FSW*, kekuatan tarik semakin tinggi. Pada kecepatan putaran 2500 rpm dan 3600 rpm, kekuatan tarik yang dihasilkan sebesar 196,67 MPa, dengan modulus elastisitas tertinggi pada kecepatan putaran 3600 rpm sebesar 68,1 GPa [6].

Menurut penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [7], penelitian dilakukan dengan menggunakan material Aluminium AA 2024-T3. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini termasuk kecepatan putar rotating tools sebesar 900 rpm, 1500 rpm, dan 2280 rpm, kedalaman pin sebesar 3,5 mm, dan *feed rate* sebesar 18 mm/menit. Hasil sambungan las *FSW* kemudian diuji untuk kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur mikro.

## 2. Metode Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan dalam pengerjaan penelitian ini meliputi beberapa langkah serti pada **Gambar 1** dibawah ini.



**Gambar 1.** Alur penelitian  
Sumber: Analisa data

### 2.1. Spesifikasi Bahan Uji

Berikut adalah **Tabel 1** yang menunjukkan komposisi kimia Aluminium 6061 berdasarkan data lapangan.

**Tabel 1.** Komposisi Kimia Aluminium 6061

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

Sumber: Analisa data pada lapangan

**Tabel 1** menunjukkan bahwa Aluminium 6061 memiliki komposisi utama Aluminium (*Al*) sekitar 95.87%, dengan unsur-unsur paduan lainnya dalam jumlah kecil, seperti *Magnesium (Mg)*, *Silikon (Si)*, *Besi (Fe)*, dan *Kromium (Cr)*, yang memberikan karakteristik mekanik dan fisik tertentu [8].

## 2.2. Prosedur Penelitian

Untuk penelitian yang melibatkan *Friction Stir Welding (FSW)*, tahapan metode penelitian biasanya mencakup beberapa langkah penting yang dijelaskan sebagai berikut:

### 1. Persiapan Spesimen

Dalam tahap persiapan spesimen untuk penelitian ini, langkah-langkah yang perlu dilakukan mencakup seperti:

- Pemilihan material yang dipilih berdasarkan komposisi yang sesuai dengan kebutuhan penelitian, misalnya Aluminium 6061.
- Persiapan material bahwa setiap pelat memiliki ukuran yang konsisten, yaitu 50 x 150 mm.
- Memastikan bahwa permukaan aluminium dalam kondisi yang baik dan siap untuk proses pengelasan.
- Pengukuran dimensi spesimen aluminium memiliki dimensi yang sesuai dengan yang direncanakan (50 x 150 mm).
- Menandai setiap spesimen aluminium untuk identifikasi yang jelas selama proses pengelasan dan pengujian [9].

### 2. Prosedur Proses Pengelasan

Proses pengelasan gesek (*Friction Stir Welding - FSW*) yang Anda jelaskan melibatkan beberapa langkah yang penting untuk memastikan pengelasan dilakukan dengan benar dan sesuai dengan parameter yang direncanakan [10]. Berikut adalah ringkasan proses pengelasan gesek berdasarkan langkah-langkah seperti berikut:

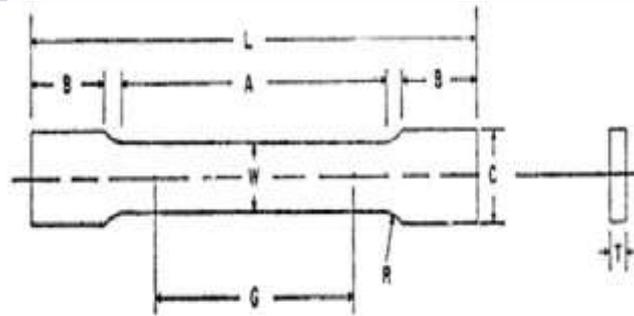
- Persiapan Mesin Frais dalam posisi vertikal untuk melakukan proses FSW.
- Menyiapkan instalasi penelitian untuk menempatkan benda kerja dan melakukan pengelasan.
- Memasang spesimen aluminium yang telah dipersiapkan pada instalasi penelitian yang telah disiapkan sebelumnya.
- Memasang *friction tool* pada pencekam yang ada pada mesin *frais* atau *milling*.
- Mengatur posisi pengelasan dalam posisi horizontal, sesuai dengan kebutuhan eksperimen.
- Mengatur *feed rate* (laju pengumpanan) sebesar 60, 90, dan 120 mm/menit.
- Mengatur kecepatan rotasi (*RPM*) *rotating tool* sebesar 1200 *RPM*. Kecepatan rotasi ini penting untuk menciptakan gesekan dan panas yang diperlukan untuk proses *FSW*.
- Memulai proses pengelasan gesek dengan menjalankan mesin frais atau *milling* dan membiarkan *friction tool* melakukan gerakan putar dan maju mundur sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan.
- Setelah proses pengelasan selesai, mendinginkan spesimen dengan media udara bebas sampai mencapai suhu ruangan.
- langkah-langkah pengaturan *feed rate*, kecepatan rotasi, dan pendinginan dapat diulang untuk mendapatkan variasi variabel yang diinginkan dalam penelitian.

### 3. Prosedur Uji Tarik

Pengujian tarik berlangsung sesuai dengan standar *ASTM E8* [11], berikut adalah langkah-langkah yang biasanya dilakukan untuk memotong dan mempersiapkan spesimen sesuai dengan prosedur:

- Menentukan dimensi yang sesuai dengan standar *ASTM E8* untuk spesimen tarik.
- Memotong benda kerja aluminium yang telah dilas menjadi spesimen dengan dimensi yang sesuai dengan standar *ASTM E8*.
- Mengamplas dan meratakan permukaan spesimen yang telah dipotong untuk memastikan bahwa tidak ada ketidakrataan atau cacat lain yang dapat mempengaruhi hasil pengujian.
- Menandai spesimen dengan informasi identifikasi yang jelas, termasuk nomor spesimen, arah grain, dan orientasi sambungan las.
- Melakukan pengujian tarik menggunakan mesin uji tarik sesuai dengan standar *ASTM E8*.
- Menganalisis data yang diperoleh dari pengujian tarik untuk mengevaluasi kekuatan tarik spesimen yang dilas.

Proses pengujian tarik dilakukan dengan benar sesuai dengan standar *ASTM E8*, sehingga hasil yang diperoleh dapat diandalkan untuk evaluasi kualitas sambungan las Aluminium 6061 yang telah dilakukan menggunakan metode *Friction Stir Welding (FSW)* Pada **Gambar 2** terdapat skema dari standar *ASTM E8* sebagai berikut.



**Gambar 2.** Skema gambar standar *ASTM E8*  
Sumber: Analisa data pada lapangan

#### 4. Prosedur Uji Kekerasan

Langkah-langkah pengujian kekerasan menggunakan metode *Vickers* sebagai berikut:

- Spesimen dipersiapkan dengan memastikan permukaannya halus dan bebas dari cacat yang dapat mempengaruhi hasil pengujian.
- Indentor *Vickers* berbentuk piramid yang terbuat dari intan dipasang pada mesin *Vickers Hardness Tester*.
- Spesimen ditempatkan di atas ragum sehingga permukaannya tegak lurus terhadap sumbu indentor.
- Ketinggian meja uji disesuaikan dan fokus antara mikroskop dengan permukaan spesimen juga disesuaikan untuk memastikan pengukuran yang akurat.
- Proses pengujian dimulai dengan menekan tombol start pada mesin *Vickers Hardness Tester*, dimana indentor akan turun perlahan.
- Monitor akan memperlihatkan peningkatan nilai gaya penekanan hingga mencapai batas gaya yang telah ditentukan sebelumnya.
- Setelah mencapai batas gaya, area yang diberi penekanan akan diukur untuk menentukan ukuran lekukan *Vickers*.
- Lekukan yang terbentuk akan diperbesar tampilannya menggunakan kontrol pembesar pada mesin *Vickers Hardness Tester*.
- Hasil pengukuran kekerasan *Vickers* akan dihitung secara otomatis menggunakan perangkat lunak yang terintegrasi dalam mesin *Vickers Hardness Tester* [12].

#### 5. Prosedur Uji Struktur Mikro

Proses pengujian struktur mikro menggunakan alat *mikrohardness FM-ARS9000*, memerlukan beberapa tahapan yang sistematis sebagai berikut:

- Spesimen dipotong untuk mempersiapkan area yang akan dianalisis struktur mikronya.
- Setelah pemotongan, spesimen dipasang pada alat bantu *ples (mounting)* untuk penghalusan permukaan.
- Proses pemolesan dilakukan untuk memperhalus permukaan spesimen hingga mencapai tingkat kehalusan yang diperlukan.
- Tahap *etsa* sangat penting karena digunakan untuk mengungkapkan struktur mikro dari material. Proses ini melibatkan penggunaan cairan *etsa* dengan komposisi khusus, seperti campuran 3%  $HNO_3$  dan 97% alkohol, yang digunakan untuk mengorek permukaan spesimen sehingga struktur mikro dapat terlihat lebih jelas. *Etsa* membantu dalam membedakan zona-zona seperti *HAZ (Heat Affected Zone)* dari material setelah proses pengelasan [13].

Setelah semua tahapan ini selesai, spesimen siap untuk dianalisis menggunakan alat *mikrohardness FM-ARS9000* untuk memeriksa struktur mikro dari daerah *HAZ*. Analisis struktur mikro ini memberikan informasi yang penting tentang efek dari proses pengelasan terhadap sifat-sifat mikrostruktural material *Aluminium 6061*, yang diperoleh setelah menggunakan teknik *Friction Stir Welding (FSW)*.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1. Hasil Pengujian

**Tabel 2** menunjukkan hasil pengujian mekanik untuk tiga sampel uji dengan menggunakan parameter-parameter seperti kekuatan luluh, kekuatan tarik, dan regangan. Berikut adalah ringkasan hasil perhitungan seperti pada **Tabel 2** berikut.

Tabel 2. Hasil Perhitungan sampel uji

Sample Uji	Perhitungan	Hasil perhitungan
60	Kekuatan luluh	$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{3641,34 N}{625 mm^2} = 87,876 N/mm^2$
	Kekuatan Tarik	$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{6986,56 N}{625 mm^2} = 91,74 N/mm^2$
	Regangan	$\varepsilon = \frac{L - L_0}{A_0} \times 100\% = \frac{52,19 - 50}{50} \times 100\% = 4,38\%$
90	Kekuatan luluh	$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{5967,63 N}{625 mm^2} = 91,574 N/mm^2$
	Kekuatan Tarik	$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{7131,34 N}{625 mm^2} = 2726,51 N/mm^2$
	Regangan	$\varepsilon = \frac{L - L_0}{A_0} \times 100\% = \frac{51,80 - 50}{50} \times 100\% = 3,60\%$
120	Kekuatan luluh	$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{4738,32 N}{625 mm^2} = 101,408 N/mm^2$
	Kekuatan Tarik	$\sigma = \frac{F}{A_0} = \frac{7643,78 N}{625 mm^2} = 2148,76 N/mm^2$
	Regangan	$\varepsilon = \frac{L - L_0}{A_0} \times 100\% = \frac{51,10 - 50}{50} \times 100\% = 2,20\%$

Sumber: Analisa data pada lapangan

Hasil ini memberikan gambaran tentang bagaimana variasi parameter *feed rate* mempengaruhi sifat mekanik dari material setelah proses *Friction Stir Welding (FSW)*, yang penting untuk evaluasi dan pengoptimalan proses dalam aplikasi industry [14].

#### 1. Hasil Pengujian Kekerasan

Berikut adalah ringkasan dari **Tabel 3** hasil pengujian tarik pada aluminium 6061 dengan tiga spesimen uji yang menunjukkan variasi *feed rate* yang berbeda.

Tabel 3. Hasil Pengujian Tarik

No.	Sampel uji	Beban Luluh (N)	Beban Max. (N)	Kekuatan Luluh ( $N/mm^2$ )	Kekuatan Tarik ( $N/mm^2$ )	Regangan (%)
1	60	3641,34	6986,56	87,8764	2538,60	4,38
2	90	5967,63	7131,34	91,5741	2726,51	3,60
3	120	4738,32	1643,78	101,408	2148,76	2,20

Sumber: Analisa data pada lapangan

Kekuatan tarik maksimum cenderung meningkat dengan peningkatan *feed rate* dari sampel uji 60 hingga 90, Namun, pada sampel uji 120, meskipun kekuatan luluh meningkat, kekuatan tarik maksimum menurun dibandingkan dengan sampel uji 90. Regangan menunjukkan kecenderungan menurun seiring dengan peningkatan *feed rate*, yang menunjukkan adanya hubungan antara parameter pengelasan (*feed rate*) dengan sifat mekanik yang dihasilkan.

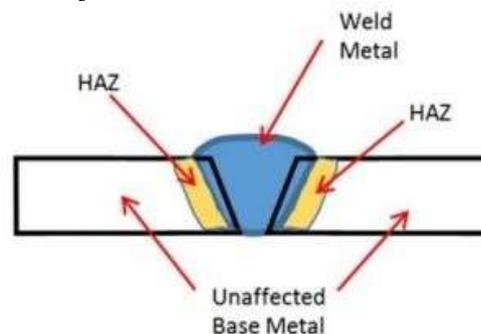
Berikut hasil pengujian Tarik untuk variasi *feed rate* dengan kecepatan tetap 1200 rpm terdapat pada **Gambar 3** grafik sebagai berikut:



**Gambar 3.** Hasil perbandingan pengujian regangan dengan *feed rate*  
Sumber: Analisa data pada lapangan

Berdasarkan dari pengujian Tarik yang telah dilakukan mendapatkan hasil pada spesimen dengan variasi parameter *feed rate* 60 mm mempunyai kekuatan Tarik 2583,60 MPa, kekuatan luluh 87,876 MPa regangan 4,38%. Pada variasi *feed rate* 90 mm mempunyai kekuatan Tarik 2726,51 MPa, kekuatan luluh 91,574 MPa dan regangan 3,60%. Pada variasi *feed rate* 120 mm mempunyai kekuatan Tarik 2148,76 MPa, kekuatan luluh 101,408 MPa dan regangan 2,20%. Dari data pengujian Tarik terlihat perbedaan kekuatan Tarik di antara setiap variasi parameter. Specimen dengan *feed rate* 90 mm memiliki kekuatan Tarik paling tinggi yaitu 2726,51 MPa dan kekuatan Tarik paling rendah terjadi pada *feed rate* 120 mm yaitu 2148,76 MPa.

Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan metode *Vickers* pada beban 200 gf. pengujian dilakukan pada *area weld metal* (sambungan pengelasan), *area heat affected zone (HAZ)*, dan *base metal* (logam dasar) baik yang telah ataupun tidak dilakukan proses *heat treatment*. Berikut **Gambar 4** area *weld metal* dan *base metal* pada spesimen uji.



**Gambar 4.** Hasil pengujian spesimen kekerasan  
Sumber: Analisa data pada lapangan

Perhatikan gambar terlihat gambar terdapat tiga titik area pengujian dimana proses pengujian ini dilakukan pada 3 spesimen berbeda. Berikut hasil perhitungan dari uji kekerasan pada *aluminium 6061* dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Berdasarkan dari pengujian kekerasan yang telah dilakukan mendapatkan hasil data pengujian dapat dilihat Dimana *aluminium 6061* pada parameter *feed rate* 60 mm memiliki nilai kekerasan sebesar (82,9 HV, 78,9 HV, dan 83,8 HV) serta rata rata HV sebesar 81,9. Pada parameter *feed rate* 90 mm memiliki nilai kekerasan sebesar (79,9 HV, 81,8 HV, dan 80,5 HV) serta rata rata HV sebesar 80,73. Pada parameter *feed rate* 120 mm memiliki kekerasan sebesar (73,5 HZ, 82,9 HZ, dan 81,8 HZ) serta rata rata HV sebesar 79,4 HZ. Sama halnya seperti uji Tarik hasil diatas menunjukkan bahwa, dengan adanya variasi dari tiap parameter yang dilakukan, dapat mempengaruhi nilai kekerasannya baik pada daerah pengelasan, daerah HAZ, maupun logam dasar.

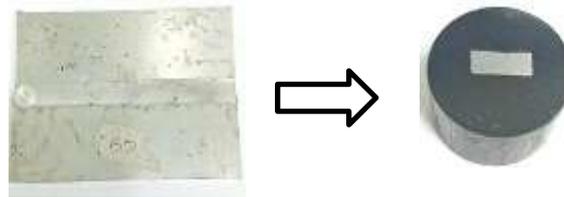
**Tabel 4.** Hasil pengujian kekerasan

No	Sampel uji	Titik	Hardness of Vickers (HV)	Average of HV
1	60	1	82,9	81,9
		2	78,9	
		3	83,8	
2	90	1	79,9	80,73
		2	81,8	
		3	80,5	
3	120	1	73,5	79,4
		2	82,9	
		3	81,8	

Sumber: Analisa data lapangan

## 2. Pengujian Struktur Mikro

Hasil pengujian mikro pada titik *Heat Affected Zone (HAZ)* menunjukkan variasi, ini bisa mengindikasikan perubahan dalam struktur mikro yang dipengaruhi oleh proses panas dari pengelasan yang dapat dilihat pada **Gambar 5**.



**Gambar 5.** Sampel pengujian struktur mikro

Sumber: Analisa data pada lapangan

Penggunaan mikroskop dengan pembesaran x500 memberikan kemampuan untuk melihat struktur mikro yang lebih detail, termasuk butiran logam dan distribusi fasa di sekitar *HAZ* dan daerah pengelasan. analisis diagram fasa *Al-Cr*, *Al-Fe*, dan *Al-Mn* adalah penting untuk memahami transformasi fasa dan struktur mikro dari material setelah proses pengelasan. Berdasarkan prosedur, fasa *Al3Mg2* adalah yang mungkin terbentuk setelah pendinginan dari suhu maksimal pengelasan *FSW* ke suhu ruangan. Fasa-fasa intermetalik seperti *Al-Cr*, *Al-Fe*, dan *Al-Mn* tidak terbentuk karena kandungan *Cr*, *Fe*, dan *Mn* dalam *Al* tidak mencapai batas yang diperlukan untuk membentuk fasa-fasa tersebut.

## 4. Kesimpulan

Kesimpulan menunjukkan bahwa pengaturan *feed rate* dalam proses *FSW* memainkan peran krusial dalam mencapai sifat mekanis dan struktural yang diinginkan dalam hasil pengelasan adalah *Feed rate* memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik spesimen. Semakin tinggi *feed rate*, kekuatan tarik spesimen cenderung menurun.

*Feed rate* juga mempengaruhi ukuran butiran dan kandungan partikel dalam struktur mikro. Semakin tinggi *feed rate*, butiran cenderung lebih besar dan jumlah partikel dapat berubah. Nilai kekerasan material berkorelasi positif dengan kekuatan tariknya. Variasi pada parameter-parameter proses pengelasan dapat mempengaruhi nilai kekerasan pada *weld metal*, *HAZ*, dan *base metal*.

## 5. Referensi

- [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] S. Mizhar, Suherman, and R. Fauzi, "Pengaruh Penambahan Magnesium Terhadap Kekerasan , Kekuatan Impak Dan Struktur Mikro Pada Aluminium Paduan ( *Al-Si* ) Dengan Metode *Lost Foam Casting*," *RisearchGate*, vol. 2, no. November 2016, pp. 77–84, 2018.

- [5] I. Saefuloh, A. Pramono, W. Jamaludin, and I. Rosyadi, "Studi Karakterisasi Sifat Mekanik Dan struktur Mikro Material Piston Alumunium-Silikon Alloy," *Flywheel J. Tek. mesin Untirta*, vol. IV, no. 2, pp. 56–62, 2018.
- [6] D. Prasetyo Koesgi, Sehonon, and D. Wicaksono, "Pengaruh Pemanasan Awal Terhadap Sifat Mekanik Sambungan Spot Friction Stir Welding Dalam Pemasangan Rivet Alumunium 2024," *Tek. STTKD J. Tek. Elektron. Engine*, vol. 7, no. 1, pp. 140–153, 2021.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] G. K. C. J. Rogo, Suharno, and Yadiono, "Pengaruh Variasi Suhu Tuang Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Pada Hasil Remelting Aluminium Tromol Supra X Dengan Cetakan Logam," *J. Nosel*, vol. 2, no. 2, 2013.
- [10] M. Hariz, D. Sayogi, M. N. Sasongko, T. Mesin, and U. Brawijaya, "Analisis Temperatur Retreating Side dan Advencing Side Sambungan Las *Friction Stir Welding* AA 6061 Pada Perbedaan Suhu Awal," vol. 2, no. April, pp. 633–639, 2023.
- [11] K. Roziqin, H. Purwanto, and I. Syafa'at, "Pengaruh Model Sistem Saluran Pada Proses Pengecoran Aluminium Daur Ulang Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Coran Pulli Diameter 76 mm dengan Cetakan Pasir," *J. Momentum UNWAHAS*, vol. 8, no. 1, p. 114152, 2012.
- [12] 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.
- [13] W. P. Aji and A. Supriyanto, "Studi Eksperimen Uji Kekerasan Dan Foto Mikro Material Komposit Alumunium - Silikon Metode Metalurgi Serbuk," *Teknika*, vol. 7, no. 2, pp. 93–98, 2021.
- [14] N. Kholis, "Analisis Hasil *Double Side Friction Stir Welding* pada Aluminium AA6061 dengan Penguat Serbuk Cu terhadap Struktur Mikro," *Suara Teknik*, vol. 14, no. 1, pp. 1–6, 2023.