

# Unveiling the Potential of Friction Stir Welding for Seamless Metal Joining: Mengungkap Potensi Pengelasan Adukan Gesekan untuk Penyambungan Logam Tanpa Batas

Dicky Fajar Rahmadan  
Mulyadi

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo  
Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Friction Stir Welding (FSW) has revolutionized metal joining in manufacturing by offering robust joints without defects. This study examines FSW using specific parameters and evaluates its impact on mechanical properties and microstructure. Through rotational speed (2192 RPM), welding speed (36.3 mm/minute), tool tilt (3.4°), and concave shoulder angle (9°), FSW was applied to predetermined metal materials. Impact and Vickers tests were conducted post-welding to assess toughness, surface hardness, and microstructural changes. Results highlight the significant influence of FSW parameters on material properties, providing insights for optimizing efficiency and quality in the manufacturing industry. The study's findings contribute to addressing knowledge gaps and advancing FSW applications in industrial settings.

## Highlight:

**Precise Parameters:** Control for strong joints in manufacturing.

**Toughness Evaluation:** Assessing joint resilience under dynamic loads.

**Industry Optimization:** Enhancing efficiency and quality in metal joining processes.

**Keyword:** FSW, Manufacturing, Mechanical Properties, Optimization, Impact Testing

## Pendahuluan

Bahan baku aluminium banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, biasanya untuk peralatan rumah tangga, konstruksi bangunan, dan peralatan teknologi. Agar dapat digunakan sesuai fungsinya, tingkat ketangguhan, keuletan, dan kualitas aluminium lainnya diuji secara berkala[1]. Setiap hasil penelitian dan percobaan tentang aluminium belum menghasilkan satu jenis campuran atau proses untuk menghasilkan aluminium yang dapat digunakan untuk segala keperluan[2]. Kekuatan aluminium murni minimal. Untuk meningkatkan kualitas aluminium murni, aluminium dapat dicampur dengan komposisi yang berbeda. Kekuatan tarik aluminium murni adalah 90 MPa, sedangkan paduan aluminium berkisar antara 200 hingga 600 MPa[3]. Aluminium memiliki berat yang sama dengan baja dan mudah dibengkokkan, dikerjakan dengan mesin, dicetak, ditarik, dan diekstrusi. salah satu paduan aluminium seri 6061[4].

Aluminium seri 6061 adalah paduan aluminium yang populer di industri maritim, khususnya bangunan lepas pantai. AA 6061 adalah paduan aluminium dengan komposisi utama magnesium

dan silikon yang memiliki ciri tidak dapat dipanaskan tetapi memiliki kekuatan korosi yang kuat, terutama korosi oleh air laut, dan mampu las yang baik[5].

Friction Stir Welding adalah teknik pengelasan yang populer. Hal ini dikarenakan tidak memerlukan logam pengisi dan dapat menghilangkan atau mengurangi jumlah retakan dan cacat porositas. Alat FSW berputar dan bergerak melintang, menyebabkan material ditempa di tengah lasan dan akhirnya meleleh[6]. Variabel dalam proses las FSW adalah setting tool dan parameter las. Kecepatan rotasi, kemiringan pahat, kecepatan perjalanan, penetrasi bahu, bentuk dan ukuran bahu, dan bahan pahat adalah semua parameter pengelasan. Untuk menilai ketahanan material perlu adanya pengujian kekerasan metode vickers dan kekuatan impact serta mempertimbangkan faktor-faktor dinamis yang dapat mempengaruhi kekuatan[7].

Metode pengujian Vickers memerlukan pengiriman beban ke benda kerja menggunakan penetrator intan berbentuk kerucut dengan sudut puncak tertentu dan beban  $F$ [8]. Dengan menghitung diagonal rata-rata lekukan pada permukaan benda uji setelah beban dilepaskan atau dihilangkan. Kekerasan Vickers (HV) adalah hasil bagi yang dihasilkan dengan membagi beban  $F$  (Kgf) dengan kurva luas permukaan indentasi ( $\text{mm}^2$ ), di mana kurva permukaan dianggap sebagai bagian dari kerucut yang diagonalnya adalah  $D$ (mm). [8]

Ketangguhan (Impact) adalah ketahanan material terhadap beban kejut. Pengujian impact berbeda dengan pengujian tarik dan kekerasan karena pembebanan dilakukan secara perlahan[9]. Pengujian impact adalah upaya untuk menciptakan kembali keadaan operasi material yang sering ditemui pada peralatan transportasi atau konstruksi di mana beban terjadi secara tiba-tiba daripada terus menerus[10]. Untuk mengakomodir dinamika tersebut, diperlukan pengujian dalam skala luas, baik dari segi jumlah maupun dimensi[11]. Namun, dari sudut pandang ekonomi, ini tidak mungkin dilakukan. Akibatnya, tes skala kecil standar yang dikenal sebagai notch tester dikembangkan. Uji dampak teknik Charpy umumnya digunakan untuk uji skala kecil[12]. Metode impact yang digunakan adalah metode Charpy merupakan pengujian tumbuk dengan meletakkan posisi specimen uji pada tumpuan dengan posisi horizontal atau mendatar dan arah pembebanan berlawanan dengan arah takikan[13]. Metode ini merupakan pengujian tumbuk dengan meletakkan posisi spesimen uji pada tumpuan dengan posisi vertikal dan arah pembebanan searah dengan arah takikan.[14]

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memvalidasi atau konfirmasi parameter optimum Friction Stir Welding pada sambungan butt joints tanpa pelakuan panas terhadap kekuatan impact,kekerasan vickers[15]. Dari penelitian ini, penulis berharap akan mendapat sebuah kesimpulan mengenai sifat mekanik pengelasan Friction Stir Welding material AA6061.

## **Metode**

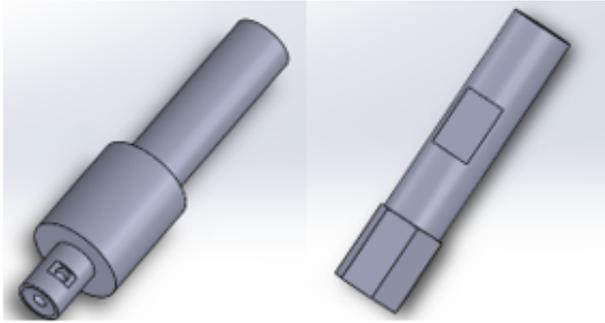
### **Tempat Dan Waktu Penelitian**

Dalam penelitian dan pengujian pengelasan dilakukan di laboratorium Teknik Mesin Umsida Universitas Muhammadiyah Sidoarjo dengan memaksimalkan pemahaman tentang konsep Friction Stir Welding dengan model sambungan butt joint

### **Desain Ekperimen**

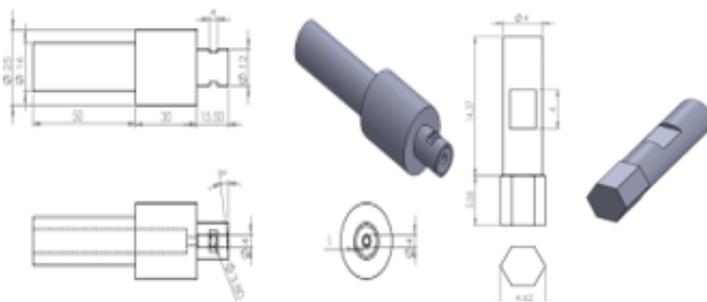
Pada Proses pembuatan sebuah alat diperlukan desain untuk konsep benda kerja dengan tujuan agar perancangan alat dapat membuat alat dengan mudah untuk menjalankan pekerjaan yang dilakukan oleh perancang. Dibawah ini merupakan rancangan desain tool FSW.

#### **1. Desain Tool FSW**



**Figure 1.** *Desain tool FSW*

## 2. Dimensi Tool FSW



**Figure 2.** *Dimensi Tool FSW*

## 3. Hasil Pembuatan Tool FSW



**Figure 3.** *Hasil Pembuatan Tool FSW*

### Alumunium AA6061-T651

Alumunium memiliki jumlah yang sangat banyak, lebih dari 300 komposisi unsur paduan pada paduan alumunium. Semua jenis paduan alumunium mengandung dua atau lebih unsur kimia yang mampu mempengaruhi sifat mekanik dari paduan tersebut [16]. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah alumunium AA6061-T6, yang merupakan paduan silikon dan magnesium (seri 6000 atau 6xxx). Di antara 6005 paduan aluminium, aluminium AA6061-T6 memiliki kekuatan tertinggi kedua dan keuletan terendah kedua. Aluminium memiliki berbagai kualitas penting, antara lain:

Berat jenis yang rendah (2,7 gr/cm<sup>3</sup>) menghasilkan bobot yang ringan

Kekuatan dan berat yang sangat luar biasa.

Suhu leleh rendah (660°C), memungkinkan pelaratan peleburan yang lebih sederhana

Memiliki pengecoran yang unggul

Permukaan luar biasa

Ketahanan korosi yang sangat baik

Penghantar panas dan listrik yang sangat baik

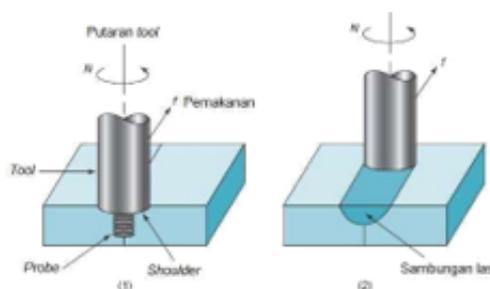
Menggabungkan dengan mudah dengan bahan lain untuk menghasilkan perpaduan yang ideal

Element	% Present
Silicon (Si)Magnesium (Mg)Manganese (Mn)Iron (Fe)Copper (Cu)Chromium (Cr)Zinx (Zn)Others (Total)Titanium (Ti)Other (Each)Aluminium (Al) B	0.40 - 0.800.80 - 1.200.0 - 0.150.0 - 0.700.15 - 0.400.04 - 0.350.0 - 0.250.0 - 0.150.0 - 0.150.0 - 0.05Balance

**Table 1.** Kandungan Kimia alumunium AA6061-T651

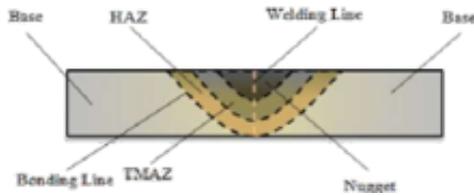
**Prinsip Kerja Friction Stir Welding (FSW)**

Prinsip kerja dari pengelasan Friction stir welding ini adalah gesekan yang terjadi secara terus menerus sehingga timbul panas, pada proses ini sebuah tool yang berputar ditempatkan pada logam yang akan disatukan. Gesekan dari tool tersebut yang berbentuk silindris terdapat pin diujungnya sehingga menimbulkan panas setempat sehingga menimbulkan panas sehingga melunakan bagian tersebut. Tool tersebut berputar secara konstan dan melaju dengan feed rate stabil dan bergerak kearah penyambungan, keduanya dilakukan secara bersamaan agar suhu tetap terjaga. Dibawah ini proses pengelasan FSW ditunjukkan pada.



**Figure 4.** Prinsip Kerja Friction Stir Welding

Panas dari putaran pahat melunakkan benda kerja di area sekitar pin, menyebabkan gerak rotasi bahan pahat di depan pin bergerak ke belakang pin, dan proses ini berlanjut tanpa batas waktu selama gerakan translasi terjadi, menghasilkan sambungan sempurna seperti yang ditunjukkan pada Gambar di bawah ini.



**Figure 5.** Heat Zone Kerja Friction Stir Welding

### Teknik Pengumpulan Data

Untuk Dapat memperoleh beberapa data penunjang yang diperlukan selama proses penelitian serta beberapa teori dalam menyusun skripsi ini maka diperlukan teknik pengumpulan data antara lain[17]:

#### 1. Studi Literatur

Studi literatur ini mengenai beberapa referensi dari jurnal yang berisi materi-materi yang berhubungan dengan friction stir welding sebagai upaya untuk mengumpulkan informasi atau data melalui beberapa sumber informasi sesuai dengan penelitian yang dilakukan.

#### 2. ObservasiLingkungan

Observasi lingkungan ini meliputi tinjauan serta pengamatan pada kondisi lingkungan yang berkaitan dengan proses penelitian. Beberapa hal yang meliputi observasi lingkungan untuk proses desain adalah pengamatan pada penelitian sebelumnya, jenis dan macam rangkaian yang digunakan, ketersediaan bahan baku berupa komponen atau material benda yang akan dirancang dan sebagainya.

## Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini pembuatan alat solar kolektor tipe plat datar yang terhubung dengan manometer U terbalik ini harus dipersiapkan terlebih dahulu komponennya agar mendapatkan hasil yang efisien dan maksimal[18].

### Persipan Alat

Yang perlu dipersiapkan sebelum melakukan eksperimen friction stir welding dan pengujian spesimen adalah sebagai berikut :

### Material spesimen

Pelat aluminium paduan 6061-T6 adalah bahan spesimen yang digunakan dalam penelitian ini. Sesuai dengan banyaknya parameter proses dengan dua kali ulangan maka diperlukan 4 pasang spesimen sehingga total menjadi 8 spesimen dengan dimensi 200 mm x 60 mm x 6 mm.



**Figure 6.** *Spesimen Alumunium*

Mesin frais

Spesifikasi proses friction stir welding pada eksperimen ini menggunakan mesin frais universal 3 axis dengan parameter sebagai berikut

Jenis mesin : Mesin Frais Universal

Type : X6322C WEIDA

Kecepatan spindle (rpm) : 2.192

Sudut kemiringan : 3,4°

Kecepatan Jalan(mm/min) : 36,3



**Figure 7.** *Mesin Frais Universal*

Tool FSW

Penelitian kali ini menggunakan variasi tool yang berbentuk hexagonal, perbedaan model pin dengan variasi perbedaan sudut bahu cekung menjadi salah satu pilihan guna mencari hasil pengelasan yang terbaik, berikut spesifikasi dan desain tool yang digunakan :

Material: Baja H13

Model Pin: Hexagonal

Sudut bahu cekung: 9°



**Figure 8.** Tool FSW

### Proses Pengerjaan

Pada percobaan proses friction stir welding, empat benda uji dilas menggunakan berbagai parameter proses sesuai dengan desain percobaan yang telah ditentukan. Langkah-langkah untuk proses pengelasan adukan gesek adalah sebagai berikut:

Di atas pelat hitam yang terletak di antara jig, ditempatkan dua pelat aluminium yang telah diverifikasi rata di atas alas mesin frais, dan kemudian digunakan jig untuk menjepitnya.

Gambar 9. Posisi pengelasan



**Figure 9.**

Pengaturan putaran mesin dan feeding dengan cara mengatur menyesuaikan hertz inverter sesuai dengan parameter yang digunakan.

Gambar 10. Inverter



**Figure 10.**

Memodifikasi pengaturan sudut kemiringan alat mesin sesuai dengan desain eksperimental untuk kemiringan 3,4



**Figure 11.** *Posisi Setting Kemiringan Mesin*

Dengan memutar gagang ke arah sumbu Z, Anda dapat menyesuaikan kedalaman pengelasan pada sholder.



**Figure 12.** *Setting Kedalaman Pengelasan*

Setelah menyesuaikan penempatan pahat pada benda, masukkan pin sedemikian rupa sehingga bahu pahat menempel pada permukaan benda di tengah antara kedua benda.



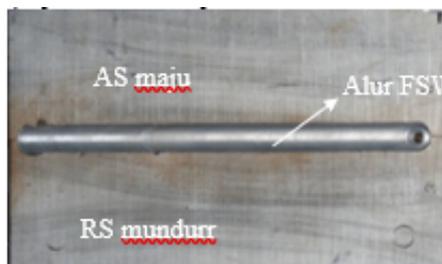
**Figure 13.** *Posisi Shoulder Mendekati Spesimen*

Setelah memindahkan meja mesin ke ujung pin dan mempertahankan kecepatan tetap, pindahkan dari spesimen secara otomatis.



**Figure 14.** *Proses Pengelasan FSW*

Setelah pengelasan selesai, lepaskan alat dari spesimen.



**Figure 15.** *Hasil Pengelasan FSW*

Uji Kekuatan Impact

Proses Uji Kekuatan Impact

Pengujian spicemen uji Impak kali ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Spesifikasi alat uji yang dipakai adalah sebagai berikut :

Tipe alat: Charpy Metode

Kapasitas: 300 joule

Berat gondam (pendulum): 15Jarak titik ayunan dengan titik pusat : 860 mm Posisi awal pemukulan (□□): 160°

Sudut pisau pemukul ( $\beta$ ): 147°

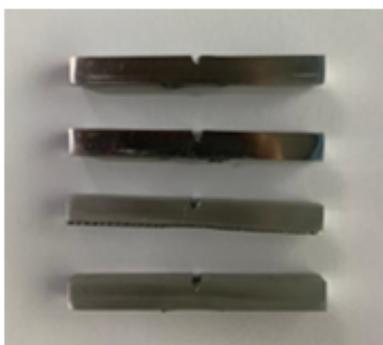
Dimensi bahan uji: 55mm x 10mm x 6mm



**Figure 16.** *Alat Uji impak Metode Charpy*

Berikut adalah prosedur pengujian impak :

1. Pasang spesimen ke landasan dengan takik di tengah, bagian takik di bagian dalam, sehingga pendulum membentur benda uji di sisi berlawanan dari sisi takik benda kerja uji.
2. Bandul setinggi H atau membentuk sudut<sup>o</sup> ( $\alpha$ )
3. Ubah posisi jarum ke skala yang lebih rendah pada angka nol.
4. Tarik *LockHandle* sehingga bandul lepas memukul benda uji, kemudian bandul tetap berayun miring ( $\beta$ )
5. Tarik *Brake Handle*, tahan agar pendulum berhenti
6. Catatan sudut  $\beta$  yang tertunjuk pada indikator
7. Setelah dilakukan pengujian ambil benda kerja untuk diukur luasan dimensi patahannya, teliti penampang patahan benda kerja dan gambarkan diidentifikasi jenis patahannya.



**Figure 17.** *Spesimen Sebelum Pengujian Impak*



**Figure 18.** *Spesimen Telah Dilakukan Pengujian Impact*

### Hasil Pengujian dan Pengolahan Data Uji Impact

Setelah benda uji impact dan mendapatkan data uji impact yang diharapkan kemudian dilakukan perhitungan untuk mencari nilai impact strength. Berikut adalah contoh perhitungan nilai impact pada spesimen :

#### Perhitungan Spesimen 1

Diketahui :

$$W = 147,1 \text{ kg}$$

$$R = 0,86 \text{ m}$$

$$\cos \alpha = 160$$

$$\cos \beta = 133$$

Jawab :

$$ER1 = W \cdot R (\cos \beta - \cos \alpha)$$

$$= 147,1 \cdot 0,86 (\cos 133 - \cos 160)$$

$$= 126,506 (-0,682 - (-0,940))$$

$$= 126,506 (0,258)$$

$$= 36,60 \text{ joule}$$

Kemudian hasil dari ketiga spesimen yang telah diuji dibuat rata-rata, energi dibagi dengan luasan spesimen

$$IS R1 = E / A$$

$$= 36,60 \text{ joule} / (40 \text{ mm}^2)$$

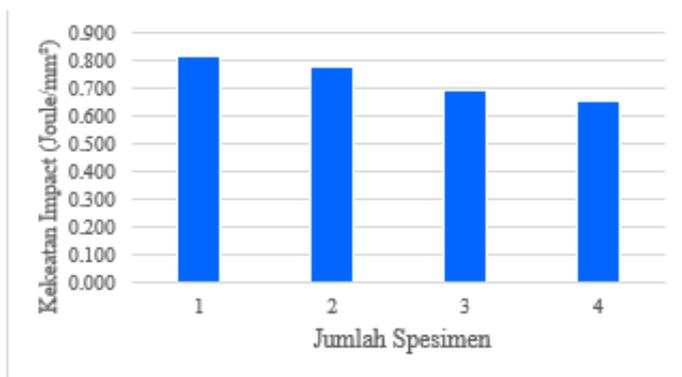
$$= 0,815 \text{ joule} / \text{mm}^2$$

Selanjutnya untuk melihat hasil dari perhitungan nilai E dan IS dilihat ditabel 2

SPC	Kecepatan Rotasi Tool (rpm)	Kecepatan pengelasan (mm/min)	Tilt Angle (°)	Sudut Bahu Cekung (°)	E	IS
					(Joule)	(Joule/mm <sup>2</sup> )
1	2.192	36,3	3,4	9	32,6	0,815
2	2.192	36,3	3,4	9	30,9	0,775
3	2.192	36,3	3,4	9	27,8	0,698
4	2.192	36,3	3,4	9	26.3	0,659

**Table 2.** Hasil Pengujian Impak Dan Perhitungan Impact Strenght

Agar memudahkan pembacaan data uji dari hasil kekuatan impak dan proses pembuatan kesimpulan dapat dilihat pada gambar 4.16 dibawah ini.



**Figure 19.** Grafik Nilai Impact Strenght

### Uji Kekerasan Vickers

#### Proses Uji Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Spesifikasi alat uji yang digunakan adalah sebagai berikut :

Nama alat: CV-700 Universal Hardness Tester

Metode Uji Kekerasan: Uji kekerasan Vickers

Perbesaran Microscop: 5x

Kapasitas: N

Gaya Tekan (F) : N

Diameter Indentor : mm

Waktu Indentasi: 15 detik

Dimensi bahan uji : 50mm x 10mm x 6mm



**Figure 20.** *Alat Uji Kekerasan*

Pilih indenter piramid baja vickers



**Figure 21.** *Indenter piramid Diameter*

Memasang indenter diameter 2,5mm pada alat uji kekerasan



**Figure 22.** *Pemasangan Indenter Pada Alat Uji*

Set lampu microscop ke arah hardness vickers



**Figure 23.** *Setting Lampu Hardness Vickers*

Pengujian kali ini menggunakan beban 980 N karena nilai kekerasan dari aluminium adalah 110 HV yang termasuk dalam tabel kolom beban 980 N, selanjutnya putar tuas ke beban 980 N



**Figure 24.** *Setting Beban 980 N*

Meletakkan spesimen uji ke anvil atau meja test, dilakukan 11 titik indentasi yaitu pada bagian Weld metal, TMAZ, dan Base metal



**Figure 25.** *Meletakkan Spesimen Pada Meja Uji*

Lakukan preload dengan memutar handle Wheel sampai garis set



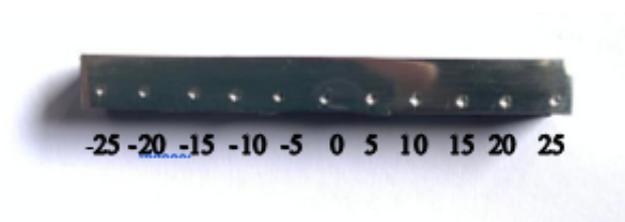
**Figure 26.** *Setting Preload*

Main load diaplikasikan dengan memutar handle ON searah jarum jam kemudian diwaktu selama 15 detik



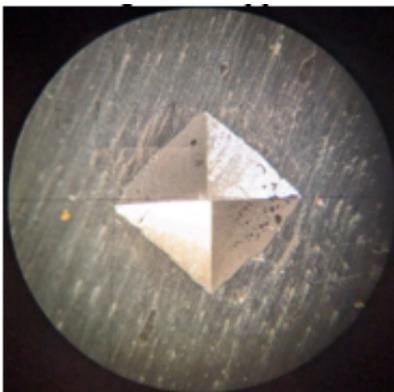
**Figure 27.** *Posisi Handle ON*

Setelah diberi beban selama 15 detik kemudian handle tuas beban diputar ke OFF dan turunkan benda uji dengan memutar handle arah CCW



**Figure 28.** *Spesimen Setelah dilakukan Indentasi*

Mengukur panjang diagonal indentasi dengan microscop perbesaran 5x



**Figure 29.** *Indentasi pada Microscop 5x*

#### Hasil Pengujian dan Pengolahan Data Kekerasan Vickers

Setelah dilakukan pengujian kekerasan Vickers yang bertujuan untuk memastikan hasil perubahan sifat mekanik material setelah dilakukan pengelasan, diperoleh data dibawah mikroskop pembesaran 5x kemudian dilakukan perhitungan untuk memastikan nilai kekerasan Vickers pada benda uji rumus dan contoh perhitungan specimen 1 pada bagian HAZ dibawah ini.

$$HV = 0.1891 \times (P/D^2)$$

Dimana :P= Beban (kgf)

D= Diameter jejak (mm)

Diketahui :P= 99.9 (kgf)

d<sub>1</sub> = 0.687(mm)

d<sub>2</sub> = 0.695(mm)

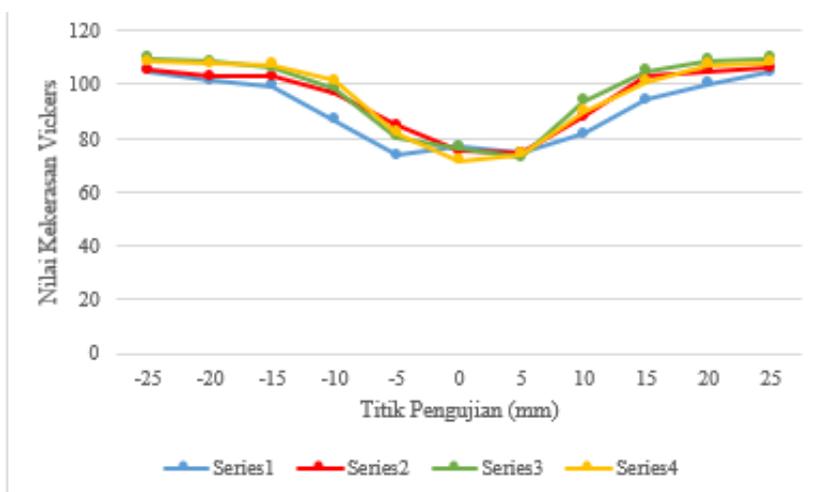
HV= 0.1891 × (99.9 / √0.691<sup>2</sup>)

HV=76.6

SPC		1	2	3	4
Parameter	Kecepatan Rotasi Tool (rpm)	2.192	2.192	2.192	2.192
	Kecepatan pengelasan (mm/min)	36,3	36,3	36,3	36,3
	Tilt Angle (°)	3,4	3,4	3,4	3,4
	Sudut Bahu Cekung (°)	9	9	9	9
Nilai Kekerasan (HV)	-25	105	105.4	109.6	108.4
	-20	101.5	102.9	108.5	107.8
	-15	99.4	103	106.1	107.3
	-10	86.7	97.1	98.4	101.3
	-5	73.8	84.8	80.2	81.9
	0	76.6	75.1	76.3	71.8
	5	74.6	74.3	72.7	74.1
	10	81.4	87.8	94	89.7
	15	94.3	103	105.1	101.1
	20	100	104.9	109.1	107.3
25	104.5	106.1	109.8	108.2	
Rata-Rata		90.71	94.95	97.25	96.26

**Table 3.** Nilai Pengujian Kekerasan Vickers

Untuk memudahkan pembacaan data hasil rata-rata pengujian nilai kekerasan Vickers, maka dapat disimpulkan dengan melihat grafik pada Gambar.



**Figure 30.** Grafik Nilai Kekerasan Pengujian Vickers

## Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tentang eksperimen friction stir welding dengan parameter optimum diuji dengan uji impact dan uji kekerasan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

Melalui analisis mendalam terhadap variabel seperti kecepatan rotasi, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan tool, sudut bahu cekung, dan geometri alat FSW, penelitian ini mengungkapkan bagaimana kombinasi yang tepat dari parameter ini dapat secara signifikan mempengaruhi ketangguhan dan kekuatan material hasil sambungan las FSW. Dari hasil pengujian impact memiliki harga impact strength tertinggi sebesar 0,815 Joule/mm<sup>2</sup> sedangkan harga tertinggi penelitian terdahulu sebesar 0,775 Joule/mm<sup>2</sup>

Berdasarkan empat rata-rata Vickers yang diperoleh yaitu 90.71, 94.95, 97.25, dan 96.26, dapat disimpulkan bahwa terdapat peningkatan secara konsisten dalam tingkat kekerasan material yang diuji. Kenaikan ini menunjukkan bahwa bahan yang diuji mengalami peningkatan daya tahan dan ketahanan terhadap tekanan atau gaya eksternal. Perbedaan nilai rata-rata yang relatif kecil antara pengukuran juga mengindikasikan konsistensi dan akurasi metode pengukuran Vickers dalam menilai kekerasan bahan.

## References

- [1] A. Wibowo et al., "Pengaruh Frekuensi Pulse Pengelasan GTAW pada Aluminium Alloy 6061," *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 59-62, 2019.
- [2] P. Sadeesh et al., "Studies on Friction Stir Welding of AA 2024 and AA 6061 Dissimilar Metals," *Procedia Eng.*, vol. 75, pp. 145-149, 2013.
- [3] S. R. Yazdi and B. Beidokhti, "Pinless Tool for FSSW of AA 6061-T6 Aluminum Alloy," vol. 267, no. November, pp. 44-51, 2019.
- [4] W. Elbar, K. Tampubolon, U. Pembinaan, and M. Indonesia, "Pengaruh Campuran Silikon pada Aluminium terhadap Kekerasan dan Tingkat Keausannya: Effect of Silicone Alloys on Aluminum on Hardness and Wear Rates," *J. Mechanical and Materials Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 183-196, 2020.
- [5] U. B. Aji Nurhafid, S. Jokosisworo, "Analisa Pengaruh Perbedaan Feed Rate terhadap Kekuatan Tarik dan Impak Aluminium 6061 Metode Pengelasan Friction Stir Welding," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 2, pp. 473-481, 2018.
- [6] A. Sudrajat and J. Rotor, "Analisis Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Aluminium AA 1100 dengan Metode Friction Stir Welding (FSW)," vol. 5, pp. 8-17, 2012.
- [7] A. F. Fandi, "Pengaruh Arah Putaran Tool terhadap Sifat Mekanik Hasil Sambungan Aluminium Friction Stir Welding," 2018.
- [8] Wartono and H. Kuntara, "Pengaruh Putaran Tools terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanis Sambungan Friction Stir Welding pada Aluminium Paduan 6061," *Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi*, pp. 1039-1044, 2017.
- [9] M. A. Dewantara, H. Yudo, D. T. Perkapalan, F. Teknik, U. Diponegoro, K. Tarik, "Analisa Pengaruh Gas Pelindung Argon Grade A dan Grade C terhadap Kekuatan Impact dan Tekuk Sambungan Butt Joint pada Aluminium 5083," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 5, no. 2, pp. 367-373, 2017.
- [10] P. A. Hutagaol, J. Junaidi, et al., "Analisa Heat Treatment terhadap Kekuatan Uji Impact Aluminium 5083," *Semin. Nas. Tek. ...*, pp. 1-4, 2022.
- [11] Y. Handoyo, "Perancangan Alat Uji Impak Metode Charpy Kapasitas 100 Joule," *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 1, no. 2, pp. 45-53, 2013.
- [12] I. P. Lokantara, "Analisis Kekuatan Impact Komposit Polyester-Serat Tapis Kelapa dengan Variasi Panjang dan Fraksi Volume Serat yang Diberi Perlakuan NaOH," *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 47-54, 2012.
- [13] F. O. Momow and R. Mufidin, "Studi Pengaruh Gerak Voeding terhadap Kekuatan Tarik

dan Ketangguhan Impak Sambungan Friction Stir Welding (FSW) pada Aluminium Paduan,” vol. 2022, no. November, pp. 568-577, 2022.

14. [14] K. Tarik, D. A. N. Impak, P. Sambungan, F. S. Welding, “Aluminium 6061 Hasil Pengelasan Double Sided,” vol. 7, no. 4, pp. 294-302, 2019.
15. [15] M. Budi et al., “Pengaruh Feed Rate dan Kecepatan Putar Pin Tool Friction Stir Welding (FSW) terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan Aluminium 5052,” vol. 2, no. 2, pp. 83-95, 2018.
16. [16] ASM International, ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams, 1998.
17. [17] H. S. Tira, A. Natsir, T. Putranto, “Kinerja Modul Surya Melalui Variasi Solar Collector dan Kecepatan Angin,” *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 10, no. 1, p. 25, 2020.
18. [18] A. Klevinskis and V. Bučinskas, “Analysis of a Flat-Plate Solar Collector,” *Mokslas - Lietuvos ateitis*, vol. 3, pp. 39-43, 2011.