

Confirmation Experiment Of Friction Stir Welding Process On Aluminum Alloy Aa 6061-T651 On Impact Strength And Vickers Hardness

[Eksperimen Konfirmasi Proses Friction Stir Welding Pada Material Aluminium Alloy Aa 6061-T651 Terhadap Kekuatan Impact Dan Hardness Vickers]

Dicky Fajar Rahmadan¹⁾, Mulyadi^{*2)}

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Email Korespondensi: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. Friction Stir Welding (FSW) has become a significant method in the manufacturing industry because of its ability to produce strong joints between metals without causing significant defects. This study aims to analyze FSW welding using certain parameters, namely rotational speed of 2192 RPM, welding speed of 36.3 mm/minute, tool tilt of 3.4°, and concave shoulder angle of 9°. This study involves the application of the FSW welding method to certain metal materials with predetermined parameters. After the welding process is complete, an impact test is carried out to evaluate the toughness of the material in the face of dynamic loads. Impact tests provide important information about crack behavior and energy absorption in the joint area affected by the welding process. In addition, the Vickers test was also carried out to measure surface hardness and determine changes in the microstructure in the joint area. The results of this study are expected to provide insight into the effect of FSW welding parameters on the mechanical properties and microstructure of the material. Analysis of the impact and hardness properties can help in understanding the extent to which a material can withstand dynamic load situations and harsh environments. In addition, this research can provide valuable information for the manufacturing industry in selecting the right parameters for a particular welding application, with the aim of increasing efficiency and quality of the end result.

Keywords – Friction Stir Welding, FSW, Uji Impact, Uji Vickers, AA6061

Abstrak. Pengelasan Friksion Stir (FSW) telah menjadi metode yang signifikan dalam industri manufaktur karena kemampuannya dalam menghasilkan sambungan yang kuat antara logam tanpa menimbulkan cacat yang signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengelasan FSW menggunakan parameter tertentu, yaitu kecepatan rotasi 2192 RPM, kecepatan pengelasan 36,3 mm/menit, kemiringan tool 3,4°, dan sudut bahu cekung 9°. Studi ini melibatkan penerapan metode pengelasan FSW pada material logam tertentu dengan parameter yang telah ditentukan. Setelah proses pengelasan selesai, dilakukan uji impact untuk mengevaluasi ketangguhan material dalam menghadapi beban dinamis. Uji impact memberikan informasi penting tentang perilaku retak dan energi absorpsi pada daerah sambungan yang terpengaruh oleh proses pengelasan. Selain itu, uji Vickers juga dilakukan untuk mengukur kekerasan permukaan dan menentukan perubahan struktur mikro pada daerah sambungan. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan tentang pengaruh parameter pengelasan FSW terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur material. Analisis terhadap sifat impact dan kekerasan dapat membantu dalam memahami sejauh mana material dapat bertahan dalam situasi beban dinamis dan lingkungan yang keras. Selain itu, penelitian ini dapat memberikan informasi berharga bagi industri manufaktur dalam memilih parameter yang tepat untuk aplikasi pengelasan tertentu, dengan tujuan meningkatkan efisiensi dan kualitas hasil akhir.

Kata Kunci - Friction Stir Welding, FSW, Uji Impact, Uji Vickers, AA6061

I. 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 (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 specimen 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.

II. METODE

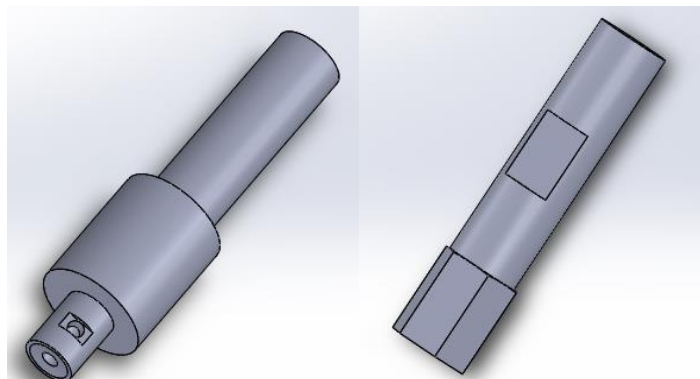
A. Tempat Dan Waktu Penelitian

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*

B. Desain Ekperimen

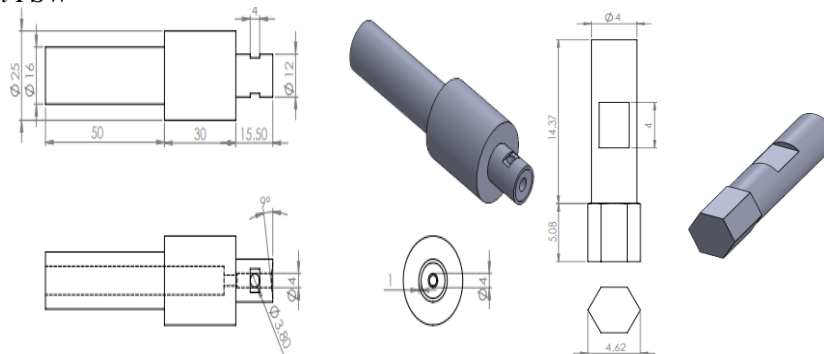
Pada Proses pembuatan sebuah alat diperlukan desain untuk konsep benda kerja dengan tujuan agar perancangan alat dapat membuat alat dengan mudah untuk menjalankan pekerjaan yang dilakukan oleh perancang. Dibawah ini merupakan rancangan desain *tool FSW*.

1. Desain *Tool FSW*



Gambar 1. Desain tool FSW

2. Dimensi Tool FSW



Gambar 2. Dimensi Tool FSW

3. Hasil Pembuatan Tool FSW



Gambar 3. Hasil Pembuatan Tool FSW

C. Aluminium AA6061-T651

Aluminium memiliki jumlah yang sangat banyak, lebih dari 300 komposisi unsur paduan pada paduan aluminium. Semua jenis paduan aluminium mengandung dua atau lebih unsur kimia yang mampu mempengaruhi sifat mekanik dari paduan tersebut [16]. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah aluminium 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:

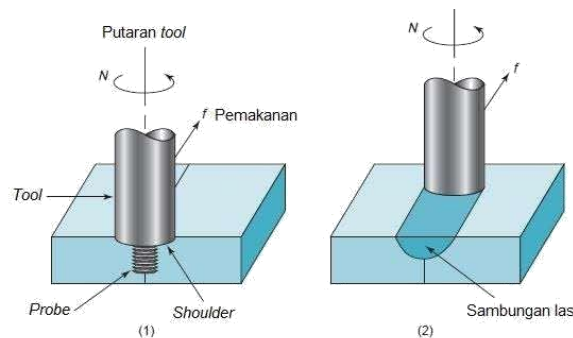
1. Berat jenis yang rendah (2,7 gr/cm³) menghasilkan bobot yang ringan
2. Kekuatan dan berat yang sangat luar biasa.
3. Suhu leleh rendah (660°C), memungkinkan pelarutan peleburan yang lebih sederhana
4. Memiliki pengecoran yang unggul
5. Permukaan luar biasa
6. Ketahanan korosi yang sangat baik
7. Penghantar panas dan listrik yang sangat baik
8. Menggabungkan dengan mudah dengan bahan lain untuk menghasilkan perpaduan yang ideal

Tabel 1. Kandungan Kimia aluminium AA6061-T651

Element	% Present
Silicon (Si)	0.40 - 0.80
Magnesium (Mg)	0.80 - 1.20
Manganese (Mn)	0.0 - 0.15
Iron (Fe)	0.0 - 0.70
Copper (Cu)	0.15 - 0.40
Chromium (Cr)	0.04 - 0.35
Zinx (Zn)	0.0 - 0.25
Others (Total)	0.0 - 0.15
Titanium (Ti)	0.0 - 0.15
Other (Each)	0.0 - 0.05
Aluminium (Al) B	Balance

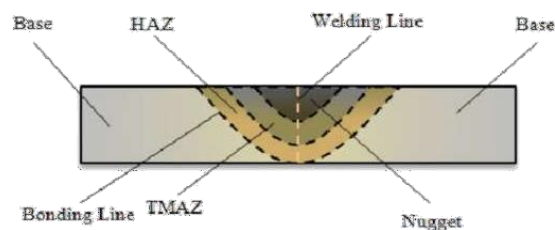
D. Prinsip Kerja *Friction Stir Welding (FSW)*

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 melunakkan bagian tersebut. Tool tersebut berputar secara konstan dan melaju dengan *feed rate* stabil dan bergerak ke arah penyambungan, keduanya dilakukan secara bersamaan agar suhu tetap terjaga. Dibawah ini proses pengelasan FSW ditunjukkan pada.



Gambar 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.



Gambar 5. Heat Zone Kerja *Friction Stir Welding*

E. 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. Observasi Lingkungan

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.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

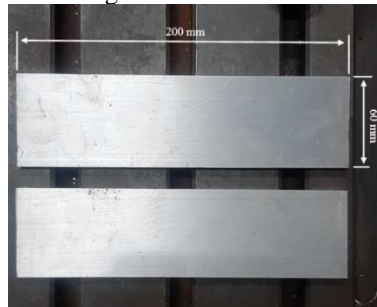
Pada penelitian ini pembuatan alat solar kolektor tipe plat datar yang terhubung dengan manometer U terbalik ini harus dipersiapkan terlebih dahulu komponennya agar mendapatkan hasil yang efisien dan maksimal[18].

A. Persipan Alat

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

1. 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.



Gambar 6. Spesimen Aluminium

2. 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



Gambar 7. Mesin Frais Universal

3. 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	: <i>Hexagonal</i>
Sudut bahu cekung	: 9°



Gambar 8. Tool FSW

B. 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:

1. 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

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



Gambar 10. Inverter

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



Gambar 11. Posisi Setting Kemiringan Mesin

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



Gambar 12. Setting Kedalaman Pengelasan

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



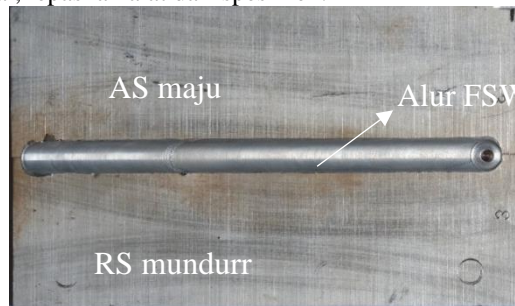
Gambar 13. Posisi Shoulder Mendekati Spesimen

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



Gambar 14. Proses Pengelasan FSW

7. Setelah pengelasan selesai, lepaskan alat dari spesimen.



Gambar 15. Hasil Pengelasan FSW

C. Uji Kekuatan Impact

1. Proses Uji Kekuatan Impact

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

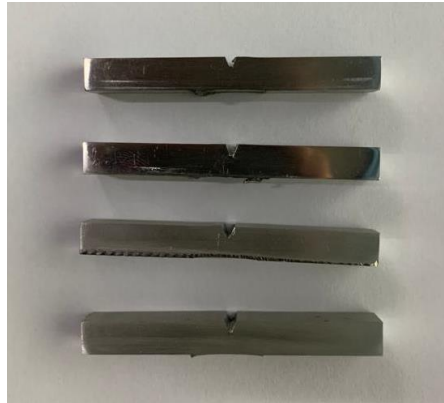
Tipe alat	: Charpy Metode
Kapasitas	: 300 joule
Berat gondam (pendulum)	: 15 Jarak
titik ayunan dengan titik pusat	: 860 mm
Posisi awal pemukulan (α)	: 160°
Sudut pisau pemukul (β)	: 147°
Dimensi bahan uji	: 55mm x 10mm x 6mm



Gambar 16. Alat Uji impact Metode Charpy

Berikut adalah prosedur pengujian impact :

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 $^\circ$ (α)
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 (β)
5. Tarik *Brake Handle*, tahan agar pendulum berhenti
6. Catatan sudut β yang tertunjuk pada indikator
7. Setelah dulakukan pengujian ambil benda kerja untuk diukur luasan dimensi patahannya, teliti penampang patahan benda kerja dan gambarkan diidentifikasi jenis patahannya.



Gambar 17. Spesimen Sebelum Pengujian Impact



Gambar 18. Spesimen Telah Dilakukan Pengujian Impact

2. 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 :

1. Perhitungan Spesimen 1

Diketahui :

$$\begin{aligned} W &= 147,1 \text{ kg} \\ R &= 0,86 \text{ m} \\ \text{Cos } \alpha &= 160 \\ \text{Cos } \beta &= 133 \end{aligned}$$

Jawab :

$$\begin{aligned} ER1 &= W \cdot R (\text{Cos } \beta - \text{cos } \alpha) \\ &= 147,1 \cdot 0,86 (\text{cos } 133 - \text{cos } 160) \\ &= 126,506 (-0,682 - (-0,940)) \\ &= 126,506 (0,258) \\ &= 36,60 \text{ joule} \end{aligned}$$

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

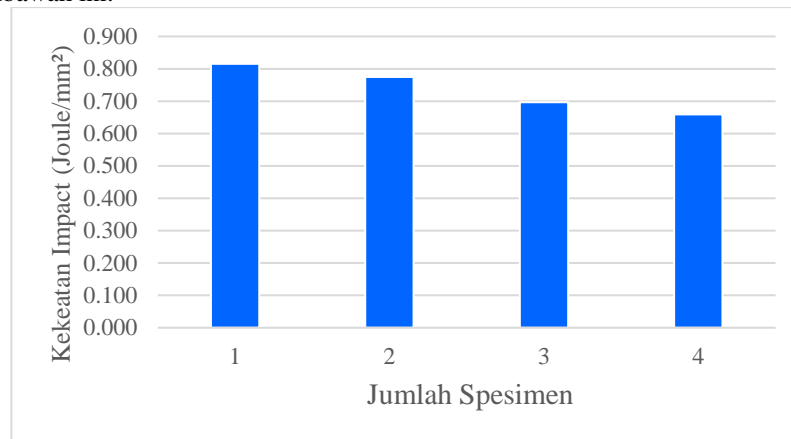
$$\begin{aligned} \text{IS R1} &= E / A \\ &= \frac{36,60 \text{ joule}}{40 \text{ mm}^2} \\ &= 0,815 \text{ joule} / \text{mm}^2 \end{aligned}$$

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

Tabel 2. Hasil Pengujian Impak Dan Perhitungan Impact Strenght

SPC	Kecepatan Rotasi Tool (rpm)	Kecepatan pengelasan (mm/min)	Tilt Angle (°)	Sudut Bahu Cekung (°)	E (Joule)	IS (Joule/mm ²)
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

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

**Gambar 19.** Grafik Nilai Impact Strenght

D. Uji Kekerasan Vickers

1. 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 <i>Universal Hardness Tester</i>
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

**Gambar 20.** Alat Uji Kekerasan

1. Pilih indenter piramid baja vickers



Gambar 21. Indentor piramid Diameter

2. Memasang indenter diameter 2,5mm pada alat uji kekerasan



Gambar 22. Pemasangan Indentor Pada Alat Uji

3. Set lampu microscop ke arah hardness vickers



Gambar 23. Setting Lampu Hardness Vickers

4. 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



Gambar 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*



Gambar 25. Meletakkan Spesimen Pada Meja Uji

- Lakukan *preload* dengan memutar *handle Wheel* sampai garis set



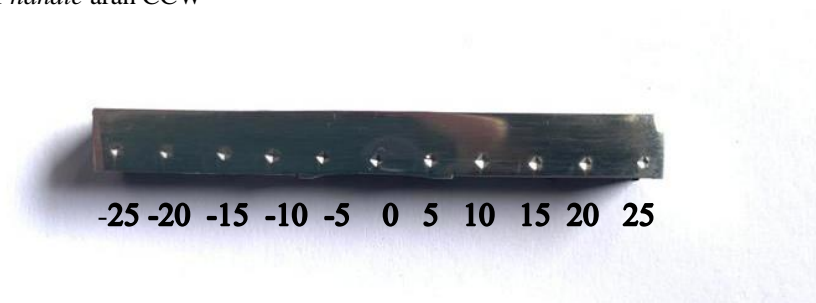
Gambar 26. Setting Preload

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



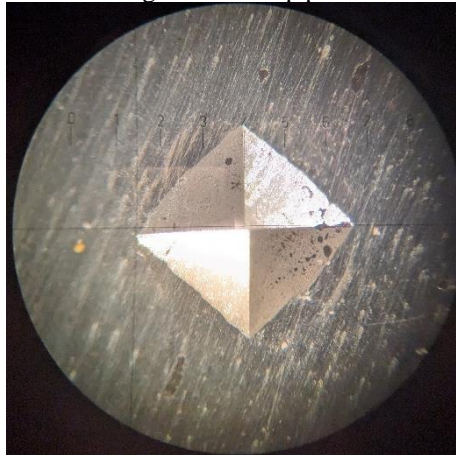
Gambar 27. Posisi Handle ON

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



Gambar 28. Spesimen Setelah dilakukan Indentasi

9. Mengukur panjang diagonal indentasi dengan microscop perbesaran 5x



Gambar 29. Indentasi pada Microscop 5x

2. 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.

$$HV = 0.1891 \times \left(\frac{P}{D^2} \right)$$

Dimana : P = Beban (kgf)
 D = Diameter jejak (mm)
 Diketahui : P = 99.9 (kgf)
 d_1 = 0.687(mm)
 d_2 = 0.695(mm)

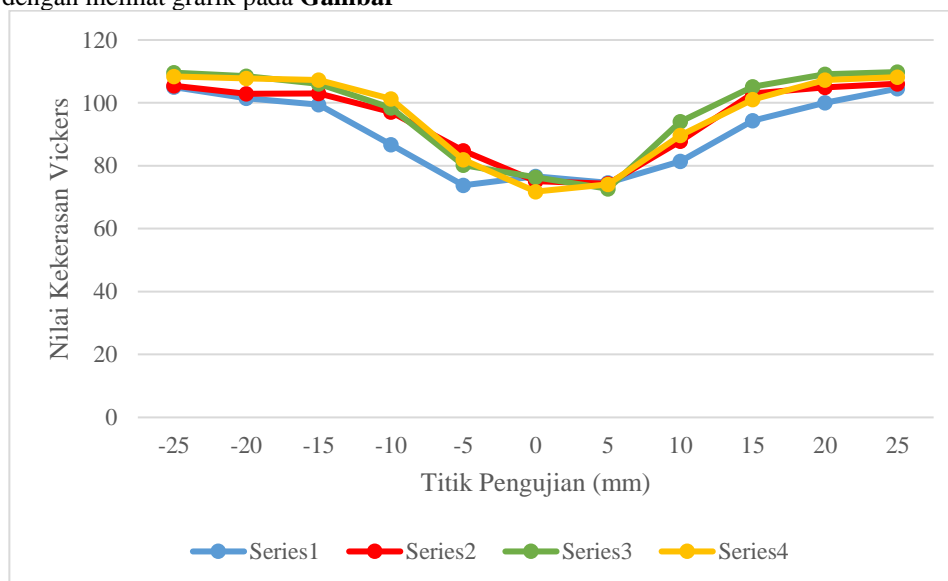
$$HV = 0.1891 \times \left(\frac{99.9}{0.691^2} \right)$$

$$HV = 76.6$$

Tabel 3. Nilai Pengujian Kekerasan Vickers

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

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

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

IV. SIMPULAN

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:

1. 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 $0,815 \text{ Joule/mm}^2$ sedangkan harga tertinggi penelitian terdahulu sebesar $0,775 \text{ Joule/mm}^2$
2. 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.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya ucapkan kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat serta rekan aslab dan juga teman-teman yang telah membantu untuk menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] A. Wibowo *et al.*, "PENGARUH FREKUENSI PULSE PENGELASAN GTAW PADA ALUMINIUM ALLOY 6061," 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, 2024, doi: 10.1016/j.proeng.2013.11.031.
- [3] S. R. Yazdi and B. Beidokhti, "Pinless tool for FSSW of AA 6061-T6 aluminum alloy," vol. 267, no. November 2018, 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," vol. 4, no. 2, pp. 183–196, 2020, doi: 10.31289/jmemme.v4i2.4070.
- [5] U. B. Aji Nurhafid, Sarjito 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) Angger Sudrajat F.P. 1, Sumarji 2, Mahros Darsin 3," vol. 5, pp. 8–17, 2012.
- [7] A. Fahrizal Fandi, "Pengaruh arah putaran tool terhadap sifat mekanik hasil sambungan, Aluminium Friction, Side Mesin, Teknik Teknik, Konsentrasi Brawijaya, Universitas Teknik, Fakultas aluminium double side 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 Wartono, Hasta Kuntara," pp. 1039–1044, 2017, [Online]. Available: <https://journal.itny.ac.id/index.php/ReTII/article/view/386>.
- [9] M. A. Dewantara, H. Yudo, D. T. Perkapalan, F. Teknik, U. Diponegoro, and 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, and ..., "Analisa Heat Treatment Terhadap Kekuatan Uji Impact Aluminium 5083 Tahun 2021," *Semin. Nas. Tek. ...*, pp. 1–4, 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/semnastek/article/view/5635%0Ahttps://jurnal.uisu.ac.id/index.php/semnastek/article/download/5635/4124>.
- [11] Y. Handoyo, "Perancangan Alat Uji Impak Metode Charpy Kapasitas 100 Joule," *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 1, no. 2, pp. 45–53, 2013, [Online]. Available: <https://jurnal.unismabekasi.ac.id/index.php/jitm/article/view/735>.
- [12] I. P. Lokantara, "Analisis Kekuatan Impact Komposit Polyester-Serat Tapis Kelapa Dengan Variasi Panjang Dan Fraksi Volume Serat Yang Diberi Perlakuan NaOH," *Din. Tek. Mesin*, vol. 2, no. 1, pp. 47–54, 2012,

- doi: 10.29303/d.v2i1.111.
- [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] K. Tarik, D. A. N. Impak, P. Sambungan, and F. S. Welding, “Aluminium 6061 Hasil Pengelasan Double Sided,” vol. 7, no. 4, pp. 294–302, 2019.
- [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] ASM International, *ASM Handbook Volume 3 : Alloy Phase Diagrams*. 1998.
- [17] H. S. Tira, A. Natsir, and T. Putranto, “Kinerja modul surya melalui variasi solar collector dan kecepatan angin,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 1, p. 25, 2020, doi: 10.29303/dtm.v10i1.302.
- [18] A. Klevinskis and V. Bučinskis, “Analysis of a Flat-Plate Solar Collector,” *Moksl. - Liet. ateitis*, vol. 3, pp. 39–43, 2011.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.