

# Analysis of Underwater Friction Stir Welding (UFSW) Process Joint on AA6005-T6 Series Aluminium Alloy on Tensile Strength and Macro Structure

## [Analisa Sambungan Proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) pada Paduan Aluminium Seri AA6005-T6 terhadap Kuat Tarik dan Struktur Makro]

Angga Ibnu Wardana<sup>1)</sup>, Mulyadi<sup>\*,2)</sup>

<sup>1,2,3)</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

\*Email Penulis Korespondensi: [mulyadi@umsida.ac.id](mailto:mulyadi@umsida.ac.id)

**Abstract.** *Underwater Friction Stir Welding (UFSW) is a variant of the friction welding process which is used to join heat-sensitive metals by avoiding excessive temperature increases along the welding line by using water as a cooling medium because it has a high cooling effect. Additionally, the process is very energy efficient and environmentally friendly compared to fusion welding. Although there are several advantages of UFSW compared to fusion welding, the thermal cycling involved in UFSW causes use in joints, especially in heat-treated aluminum alloys such as AA6005-T6, due to dissolution or damage to the reinforcing joint, resulting in a reduction in mechanical properties. The aim of analyzing UFSW process joints on AA6005-T6 series aluminum alloy on tensile strength and macro structure is to evaluate the influence of UFSW process variables such as spindle rotation speed, welding speed, and water pressure. The research results showed that the tensile strength was 12,006 kgf/mm<sup>2</sup>, and when observing the macro structure, no defects occurred.*

**Keywords -** *Underwater Friction Stir Welding (UFSW), aluminium alloys such as AA6005-T6, tensile strength, macro-structures, variables of the UFSW process*

**Abstrak.** Underwater Friction Stir Welding (UFSW) merupakan salah satu varian proses pengelasan gesek yang digunakan untuk menyambung logam-logam yang peka terhadap panas dengan menghindari kenaikan suhu yang berlebihan disepanjang garis pengelasan dengan menggunakan air sebagai media pendingin karena mempunyai efek pendinginan yang tinggi. Selain itu, prosesnya sangat hemat energi dan ramah lingkungan dibandingkan dengan pengelasan fusi. Meskipun ada beberapa keunggulan UFSW dibandingkan dengan pengelasan fusi, siklus termal yang terlibat dalam UFSW menyebabkan penggunaan pada sambungan, terutama pada paduan aluminium yang diberi perlakuan panas seperti AA6005-T6, karena pelarutan atau kerusakan pada sambungan penguat, sehingga mengakibatkan pengurangan dalam sifat mekanik. Tujuan dari analisis sambungan proses UFSW pada paduan aluminium seri AA6005-T6 terhadap kekuatan tarik dan struktur makro adalah untuk mengevaluasi pengaruh variabel proses UFSW seperti kecepatan putaran spindle, kecepatan pengelasan, dan tekanan air. Hasil penelitian menunjukkan kuat tarik sebesar 12,006 kgf/mm<sup>2</sup> dan jika dilihat dari struktur makro tidak terjadi cacat.

**Kata Kunci -** Underwater Friction Stir Welding (UFSW), paduan aluminium seperti AA6005-T6, daya tarik, struktur makro, variabel proses UFSW

## I. PENDAHULUAN

*Underwater Friction Stir Welding (UFSW)* adalah teknik penyambungan yang umum digunakan dalam industri pengelasan, terutama untuk paduan aluminium [1]. Dalam upaya untuk mengurangi emisi dan menghemat energi, penggunaan paduan aluminium sebagai bahan ringan untuk sasis mobil telah meningkat, membutuhkan pengembangan proses penyambungan yang efektif [2]. Penelitian ini menyelidiki pengelasan aluminium 6005 T-6 dalam dua kondisi berbeda: di darat dan di bawah air, dengan variasi kecepatan pengelasan. Evaluasi dilakukan terhadap pengaruh UFSW pada mikrostruktur dan sifat mekanik, dibandingkan dengan Friction Stir Welding (FSW) yang telah lama digunakan dalam industri [3]–[5].

Sejak ditemukan oleh *The Welding Institute (TWI)* pada tahun 1991, FSW telah menjadi metode penyambungan yang luas digunakan [6]. Beberapa penelitian menyoroti potensi UFSW untuk meningkatkan sifat mekanik dan menghasilkan struktur butir yang lebih optimal. Meskipun begitu, tantangan seperti pembentukan pita Lueder dan perubahan struktur mikro tetap menjadi perhatian dalam aplikasi paduan aluminium dalam industri otomotif, yang mendorong penggunaan UFSW sebagai proses yang penting untuk meningkatkan sifat mampu bentuk dan struktur makro sambungan [7].

Pengelasan berbagai paduan aluminium yang sulit untuk dilas dengan fusi konvensional merupakan tantangan dalam industri. Studi terbaru oleh Benavides dkk. menunjukkan bahwa penggunaan media cair dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasan sambungan pada FSW dengan mengatur suhu secara tepat. Selain itu, eksperimen oleh Fang dkk. dan Hofmann dkk [8]. pada proses UFSW telah menghasilkan hasil yang menjanjikan dengan memperhalus struktur butir berkat laju pendinginan yang cepat. Temuan lain oleh Yong dkk. menunjukkan bahwa UFSW dapat menghasilkan panas yang cukup dalam sampel yang dilas di bawah air [9]. Studi sebelumnya juga telah mengonfirmasi potensi UFSW untuk meningkatkan sifat mekanik, mengoptimalkan struktur butir, dan menghasilkan zona pelunakan yang diinginkan [10].

Di sektor industri otomotif, di mana paduan aluminium semakin digunakan untuk menggantikan baja karena ringannya dan efisiensi bahan bakarnya, kemajuan dalam metalurgi aluminium memungkinkan penerapannya dalam berbagai komponen mobil, seperti panel bodi dan atap [11]. Namun, proses pengelasan paduan aluminium tetap menantang karena pembentukan pita Lueder dan perubahan struktur mikro yang mempengaruhi kemampuan bentuk sambungan. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang proses pengelasan seperti UFSW sangat penting untuk mencapai sambungan yang berkualitas dan memenuhi persyaratan kebutuhan industri [12].

Selain itu, UFSW adalah pilihan yang tepat untuk meningkatkan struktur makro dan kemampuan bentuk dari sambungan paduan aluminium yang dilas [13]. Beberapa peneliti telah fokus pada pengembangan peningkatan kekuatan, namun metode FSW memiliki potensi untuk mengelas bahan yang berbeda, termasuk yang tidak kompatibel [14]. Meskipun demikian, tantangan seperti cacat dalam proses UFSW memerlukan perhatian khusus [15]. Cacat seperti hot cracking dan cacat terowongan perlu diidentifikasi dan dipahami penyebabnya guna meningkatkan kualitas sambungan [16]. Identifikasi penyebab cacat tersebut, seperti suhu rendah atau kecepatan pengelasan yang tinggi, menjadi langkah penting dalam pengembangan proses UFSW yang lebih baik. Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini menekankan analisis sambungan proses UFSW pada paduan aluminium seri AA6005-T6 terhadap kekuatan tarik dan struktur makro [17].

## II. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dirancang untuk secara komprehensif menyelidiki pengaruh *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) pada sambungan paduan aluminium seri AA6005-T6 terhadap kekuatan tarik dan struktur makro. Metode ini mencakup tahapan yang terstruktur dan terukur, mulai dari persiapan sampel hingga analisis hasil. Pertama-tama, sampel paduan aluminium disiapkan dengan memperhatikan standar yang telah ditetapkan. Selanjutnya, proses UFSW dilakukan dengan variasi parameter tertentu, seperti kecepatan putar spindle, kecepatan pengelasan, dan tekanan air. Setelah proses pengelasan selesai, sampel diuji menggunakan berbagai metode uji, termasuk uji tarik untuk mengevaluasi kekuatan tariknya, serta analisis struktur makro untuk memahami karakteristik fisik sambungan. Hasil dari pengujian dan analisis kemudian dianalisis secara komprehensif untuk mendapatkan pemahaman yang mendalam tentang pengaruh parameter proses terhadap sifat mekanik dan struktur sambungan.

Bahan yang digunakan untuk penelitian ini yaitu aluminium AA 6005 T-6 yang berbentuk lembaran dengan panjang 160 mm, lebar 40 mm dengan ketebalan 3 mm. Bahan aluminium mempunyai komposisi kimia dan material properties seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut ini.

**Tabel 1.** Komposisi kimia aluminium AA 6005 T-6

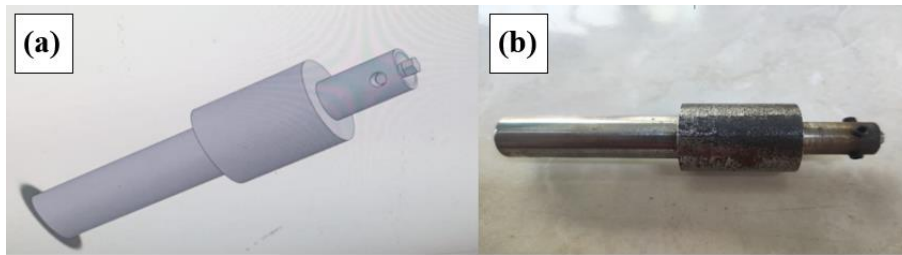
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.6-0.9	0.35	0.1	0.1	0.4-0.6	0.1	0.1	0.1	Pengikat

**Tabel 2.** Material Properti Aluminium 6006 T-6

<b>Aluminium AA 6005 T-6</b>	
Proof Stress	225 Min MPa
Tensile Strength	270 Min Mpa
Elongation A50 mm	8%
Shear Strength	205 MPa
Hardness Brinell	90 HB
Elongation A	10 Min %

Proses pengelasan menggunakan tool dari bahan H-13 *Hardness Steel* dengan panjang tool 100 mm, dan diameter pin tool 4 mm berbentuk *hexagonal*, sudut kemiringan *tool shoulder* 3°. Sudut kemiringan tool shoulder yang dipakai

pada penelitian ini adalah  $5^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $11^\circ$  terhadap sumbu tegak lurus pada permukaan benda kerja Tipe sambungan las *But Joint*, bentuk tool seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dibawah.

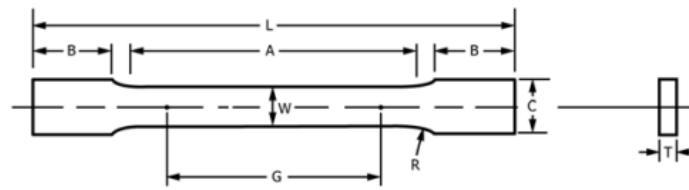


**Gambar 1.** Tool UWFSW: (a) desain tool dan (b) manufaktur tool

Pengujian makro dengan menggunakan alat metalografi dapat memberikan wawasan yang berharga tentang struktur dan kualitas sambungan yang dihasilkan oleh proses UFSW. Berikut langkah-langkah pengujian makro dengan menggunakan alat metalografi:

1. **Persiapan Sampel:** Pertama-tama, persiapkan sampel sambungan yang telah dihasilkan dari proses UFSW. Pastikan sampel telah dibersihkan dengan baik dari kontaminan dan debris potensial.
2. **Pemotongan Sampel:** Gunakan alat pemotong yang sesuai untuk memotong sampel menjadi ukuran yang diinginkan, sesuai dengan kebutuhan pengujian makro. Pastikan potongan sampel memiliki permukaan yang rata dan bersih.
3. **Pengamplasan:** Setelah dipotong, permukaan sampel perlu diampas untuk menghilangkan jejak pemotongan dan untuk mendapatkan permukaan yang halus dan datar. Proses pengamplasan dilakukan dengan menggunakan kertas amplas bertekstur halus secara bertahap.
4. **Pembersihan:** Setelah pengamplasan, bersihkan sampel secara menyeluruh untuk menghilangkan sisa-sisa debu atau partikel yang mungkin menempel pada permukaannya. Gunakan cairan pembersih dan lap bersih untuk membersihkan sampel dengan hati-hati.
5. **Pengukuran dan Pencitraan:** Selanjutnya, letakkan sampel yang telah dipersiapkan di bawah mikroskop metalografi. Gunakan perbesaran yang sesuai untuk mengamati struktur makro dari sambungan UFSW. Dengan bantuan kamera yang terintegrasi, ambil gambar permukaan sampel untuk dokumentasi dan analisis lebih lanjut.
6. **Analisis Struktur Makro:** Dengan menggunakan perangkat lunak khusus, lakukan analisis struktur makro dari gambar yang diambil. Identifikasi berbagai fitur struktural seperti zona pengaruh panas, zona terpengaruh panas, zona campuran, dan zona basis.
7. **Interpretasi Hasil:** Terakhir, interpretasikan hasil analisis struktur makro untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang karakteristik sambungan UFSW. Identifikasi zona-zona yang berbeda dalam sambungan dan evaluasi integritas struktural secara keseluruhan.

Pengujian tarik untuk material aluminium mengacu pada ASTM E8 / E8M - 16a "*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*". Ini adalah standar yang digunakan secara luas untuk menguji sifat mekanik material logam, termasuk aluminium. Standar ini mencakup prosedur uji tarik untuk mengevaluasi kuat tarik, titik luluh, dan sifat-sifat lainnya dari bahan logam seperti pada Gambar 2.



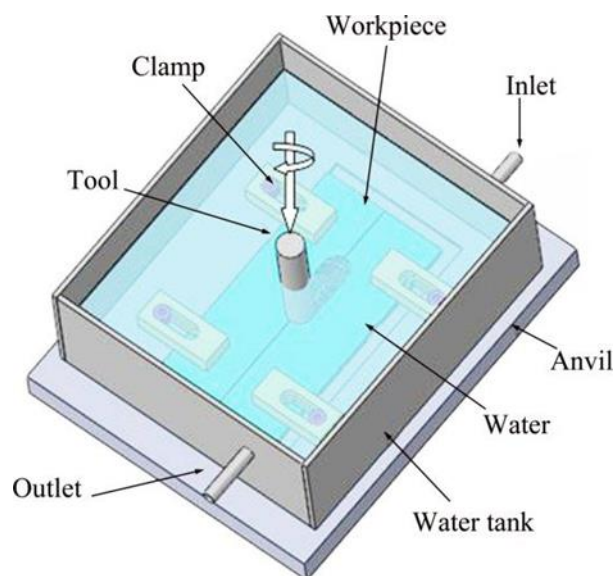
	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 in.] Wide
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length (Note 1 and Note 2)	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width (Note 3 and Note 4)	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness (Note 5)		thickness of material	
R—Radius of fillet, min (Note 6)	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min (Note 2, Note 7, and Note 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced parallel section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section, min (Note 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate (Note 4 and Note 9)	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

Gambar 2. Standar uji Tarik *metallic materials*

Desain eksperimen model untuk proses pengelasan mengikuti struktur dan layout yang tercantum dalam Tabel 3 dan Gambar 3. Proses pengelasan akan dilakukan dengan memperhatikan parameter-parameter yang tertera dalam Tabel 3, termasuk kecepatan putar spindle, kecepatan pengelasan, dan tekanan air. Spesimen las akan ditempatkan sesuai dengan layout yang digambarkan dalam Gambar 3 untuk memastikan konsistensi dan akurasi proses pengelasan.

Tabel 3. Eksperimen *UFSW*

No.Eks	Kecepatan rotasi (Rpm)	Kecepatan pengelasan (mm/min)	Derajat sudut kemiringan tool (deg)	Sudut bahu cekung (deg)	Kekuatan Tarik (Kgf/mm <sup>2</sup> )
1	2200	20	3	5	...
2	2200	20	3	8	...
3	2200	20	3	11	...

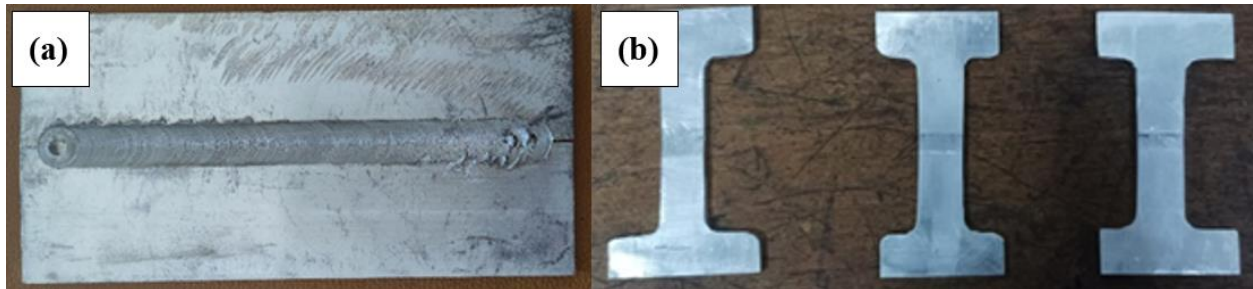


Gambar 3. Layout pengelasan *UWFSW*

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Hasil las dan data uji Tarik

Hasil pengelasan UFSW tergambar pada Gambar 4a, dimana proses pengelasan diinisiasi dengan memutar pin pada kecepatan 2200 rpm dengan arah searah jarum jam. Pin kemudian dibenamkan ke dalam material dengan kedalaman sekitar 2,7 mm. Tool bergerak maju dengan kecepatan 20 mm/menit. Setelah mencapai panjang yang ditentukan, pin diangkat dari material. Proses pengelasan selesai, lalu dilanjutkan dengan pembentukan spesimen uji tarik dan uji makro untuk evaluasi lebih lanjut pada Gambar 4b. Dengan demikian, proses pengelasan UFSW mengikuti serangkaian langkah yang terperinci, mulai dari inisiasi pengelasan hingga tahap pembentukan spesimen uji.



**Gambar 4.** Hasil las UFSW: (a) manufaktur las dan (b) bentuk spesimen uji Tarik

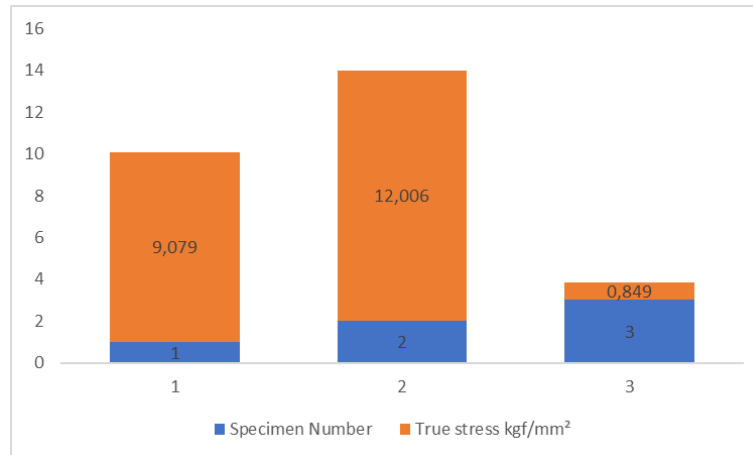
Pada pengelasan menggunakan sudut bahu cekung yang berbeda, seperti dalam kasus ini, kekuatan tarik yang berbeda bisa disebabkan oleh sejumlah faktor yang berkaitan dengan geometri dan karakteristik sambungan. Sudut bahu cekung yang berbeda dapat mempengaruhi distribusi stres selama proses pengujian tarik. Sudut bahu yang lebih besar, seperti pada spesimen nomor 3, cenderung menyebarkan stres secara lebih merata, mungkin mengurangi titik-titik konsentrasi stres yang bisa menyebabkan kegagalan. Sudut bahu cekung yang lebih besar mungkin membantu mengurangi kemungkinan terbentuknya cacat seperti retakan atau terowongan, karena mungkin memberikan lebih banyak ruang untuk pergerakan logam cair selama proses pengelasan. Sebaliknya, sudut yang lebih kecil mungkin meningkatkan risiko terjadinya cacat karena dapat menyebabkan penumpukan stres yang lebih besar. Sudut bahu cekung yang berbeda dapat mempengaruhi perilaku material selama proses pengelasan dan pengujian tarik. Sebagai contoh, pada sudut yang lebih kecil, deformasi plastis mungkin lebih terlokalisasi, sementara pada sudut yang lebih besar, deformasi mungkin lebih merata di seluruh sambungan.

Dalam konteks ini, spesimen nomor 2 yang memiliki sudut bahu cekung  $8^\circ$  yang tidak menunjukkan cacat memberikan kekuatan tarik yang lebih tinggi sebesar 12.006 Kgf/mm<sup>2</sup> karena distribusi stres yang lebih merata dan kemungkinan terjadinya cacat yang lebih rendah. Sementara itu, spesimen nomor 1 dan 3 mungkin memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah karena efek dari sudut bahu cekung yang lebih kecil dan lebih besar, yang dapat meningkatkan risiko terbentuknya cacat dan ketidaksempurnaan dalam sambungan.

**Tabel 4.** Data uji spesimen material AA6005-T6

Spesimen Number	True stress kgf/mm <sup>2</sup>	True strain	Stress engineer kgf/mm <sup>2</sup>	Strain engineer
1	9,079	0,024	8,846	0,026
2	12,006	0,034	11,648	0,035
3	0,849	0,030	0,824	0,031





**Gambar 5.** Hasil uji Tarik masing-masing spesimen UFSW

### B. Hasil uji makro

Hasil uji makro pada Gambar 6 menggambarkan perbedaan pada tiga spesimen yang diuji, masing-masing dengan sudut bahu cekung yang berbeda. Spesimen (a) dengan sudut bahu cekung 5° menunjukkan tanda-tanda korosi yang mulai terjadi perlahan di atas permukaannya, disebabkan oleh cacat retak yang muncul selama proses pengelasan. Di sisi lain, spesimen (b) dengan sudut bahu cekung 8° menunjukkan hasil uji makro yang tidak menunjukkan adanya cacat, menandakan hasil sambungan yang baik tanpa retakan. Namun, pada spesimen (c) dengan sudut bahu cekung 11°, terlihat adanya cacat terowongan pada hasil uji makro di permukaan sambungan pengelasan. Perbedaan ini menyoroti pentingnya pemilihan parameter yang tepat dalam proses pengelasan untuk mencegah cacat dan memastikan kualitas sambungan yang optimal.

Sudut bahu cekung 8° dianggap lebih baik karena pada sudut tersebut, spesimen menunjukkan hasil uji makro yang tidak menunjukkan adanya cacat atau retakan pada permukaan sambungan pengelasan. Ini mengindikasikan bahwa proses pengelasan pada sudut bahu cekung 8° menghasilkan sambungan yang lebih kuat dan berkualitas, tanpa mengalami masalah seperti cacat atau retakan yang dapat mengurangi kekuatan dan integritas struktural. Hal ini bisa disebabkan oleh fakta bahwa sudut tersebut mungkin memberikan distribusi panas dan tekanan yang lebih merata selama proses pengelasan, mengurangi kemungkinan terjadinya cacat atau ketidaksempurnaan lainnya dalam sambungan. Oleh karena itu, sudut 8° dapat dianggap sebagai pilihan yang lebih optimal dalam konteks ini.



**Gambar 6.** Hasil uji makro spesimen 1, 2, dan 3 UFSW

## VII. SIMPULAN

Sudut bahu cekung memainkan peran penting dalam menentukan kekuatan tarik dan kualitas sambungan. Sudut yang lebih besar cenderung memberikan distribusi stres yang lebih merata dan mengurangi risiko terbentuknya cacat, sehingga menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Sebaliknya, sudut yang lebih kecil mungkin meningkatkan risiko terjadinya cacat dan ketidaksempurnaan dalam sambungan, yang berdampak pada penurunan kekuatan tarik. Oleh karena itu, untuk meningkatkan kualitas sambungan dalam proses pengelasan UFSW, disarankan untuk memilih sudut bahu cekung yang optimal yang dapat menghasilkan distribusi stres yang merata dan mengurangi risiko terjadinya cacat, sehingga dapat mencapai sambungan dengan kekuatan tarik yang optimal.

Pemilihan sudut bahu cekung mempengaruhi secara signifikan kualitas sambungan pada proses pengelasan UFSW. Spesimen dengan sudut bahu cekung 8° menunjukkan hasil uji makro yang tidak menunjukkan adanya cacat atau retakan, menandakan sambungan yang baik tanpa masalah struktural yang signifikan. Hal ini menegaskan bahwa sudut 8° mungkin merupakan pilihan yang lebih optimal untuk menghasilkan sambungan yang kuat dan berkualitas dalam proses pengelasan UFSW. Oleh karena itu, dalam prakteknya, disarankan untuk mempertimbangkan penggunaan sudut bahu cekung 8° untuk mencapai sambungan yang optimal dan mencegah terjadinya cacat, sehingga memastikan keandalan struktural yang tinggi dalam aplikasi yang lebih luas.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih yang tulus saya sampaikan kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo atas ilmu dan wawasan berharga yang telah diberikan selama proses pembelajaran. Tak lupa, terima kasih juga kepada para rekan tim UFSW atas kerjasama yang luar biasa dan dukungan yang diberikan. Saya juga mengucapkan terima kasih kepada orang tua yang selalu memberikan dukungan dan dorongan dalam setiap langkah perjalanan ini. Tidak lupa, penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada teman-teman yang selalu memberi semangat hingga tugas akhir ini terselesaikan. Semua kontribusi dan dukungan yang diberikan sangat berarti bagi saya, dan saya sangat bersyukur atas kebersamaan ini. Terima kasih atas segalanya.

## REFERENSI

- [1] R. Silalahi, Triyono, D. Prayitno, and S. Annas, "Studi Friction Stir Welding ( Fsw ) Pada Lembaran Al 5083 Dan," *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2, pp. 129–136, 2023.
- [2] I. Priyahapsara and S. Mulyani, "Analisis Kualitas Sambungan Alumunium 2024 Menggunakan Metode Friction Stir Welding (FSW) Dengan Variasi Kekerasan Material Pin," *Conf. Senat. STT Adisutjipto Yogyakarta*, vol. 6, pp. 99–106, 2020, doi: 10.28989/senatik.v6i0.400.
- [3] Tarmizi and B. Prayoga, "Analisa Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Pada Proses Friction Stir Welding Alumunium 5052 Analysis of Mechanical Properties and Micro Structure in the Process of Friction Stir Welding Aluminum 5052," *J. Ris. Ind.*, vol. 10, pp. 70–82, 2016.
- [4] Mulyadi, A. Wahjudi, A. S. Pramono, I. M. L. Batan, and Ubaidillah, "A study of concave shoulder angle on the mechanical properties and fractography of friction stir welded AA6061-T651 joints," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 28, no. December 2023, pp. 78–86, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.11.258.
- [5] M. Mulyadi, R. Firdaus, I. Iswanto, and M. N. Rizki, "Pengaruh parameter proses friction stir welding dengan material aluminium alloy AA6061-T651 terhadap distorsi dan kekerasan," *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 2, 2022, doi: 10.24127/trb.v11i2.2171.
- [6] D. Program, S. Teknik, P. Cilacap, T. Penelitian, and T. Pustaka, . "Distribusi Nilai Kekerasan Pada Las Friction Stir Welding ( Fsw ) Pada Paduan Aluminium Dengan Aplikasi Transient Thermal ( Tt )," vol. 5, no. 02, 2011.
- [7] N. Febriyanto, "Analisa Sambungan Aluminium 5083 Yang Disambung Menggunakan Metode Las Gesek ( Skripsi ) Oleh : Nanjar Febriyanto Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Analysis Of Aluminium 8053 Connection Using," 2018.
- [8] A. A. Tig, "Studi Komparasi Sambungan Las Dissimilar AA5083-," 2012.
- [9] S. Wartono, "Pengaruh Shot Peening Terhadap Kekasaran Permukaan Dan Sifat Mekanis Sambungan Friction Stir Welding Pada Aluminium Seri 5083," *Pengaruh Shot Peen. Terhadap Kekasaran Permukaan Dan Sifat Mek. Sambungan Frict. Stir Weld. Pada Alum. Seri 5083*, no. c, pp. 2–6, 2013.
- [10] G. V. Kozlov and Y. G. Yanovskii, "- Microhardness," *Fractal Mech. Polym.*, vol. 5, pp. 256–265, 2014, doi: 10.1201/b17730-17.
- [11] K. Tarik, K. Lembaran, and A. L. Dan, "33 <https://publikasi.kocenin.com/index.php/huma>," pp. 33–40, 2023.

- [12] D. Prasetyo Koesgi, Sehon, 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, doi: 10.56521/teknika.v7i1.315.
- [13] 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.
- [14] R. F. A. Putra, “Skripsi pengaruh sudut kemiringan tool micro friction stir welding terhadap sifat fisis dan mekanis pada sambungan aluminium 1100,” 2020.
- [15] B. A. B. Ii and T. Pustaka, “[https://repository.um-surabaya.ac.id/6733BAB\\_II.pdf](https://repository.um-surabaya.ac.id/6733BAB_II.pdf) repository.um-surabaya.ac.id F Adi Prasetyo · 2013,” pp. 1–20.
- [16] B. P. Adi, M. A. Irfa`i, and M. M. Rosadi, “Pengembangan alat uji impak charpy di bagian pengereman, berat pendulum, dan skala ukur pada mesin impak charpydi Laboratorium Teknik Mesin Unhasy,” *ARMATUR Artik. Tek. Mesin Manufaktur*, vol. 1, no. 2, pp. 75–81, 2020, doi: 10.24127/armatur.v1i2.339.
- [17] В. А. Никаноров, А. Е. Косолапов, V. а Nikanorov, and а Е. Kosolapov, “Никаноров В.А. 1 , Косолапов А.Е. 2 2,” vol. 5, no. September, pp. 188–194, 2018.

**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.*