

Analysis of Underwater Friction Stir Welding of Process Connection on Alumunium Series 6005-T6 on Impact Strength and Micro Structure

[Analisis Sambungan Proses Underwater Friction Stir Welding pada Alumunium Seri 6005-T6 terhadap Kuat Impact dan Struktur Micro]

Fikri Widihari Prasetya¹⁾, Mulyadi^{*.2)}

^{1,2,3)}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. *Underwater Friction Stir Welding (UFSW) is a solid state welding process that is able to unite materials with water that are relatively difficult to weld using fusion welding. Additionally, this process is very energy efficient and friendly compared to fusion welding. While there are several advantages of UFSW over fusion welding, the thermal cycling involved in UFSW can cause softening of the joint, especially in Heat Treatable Aluminum Alloys (HTTA), in this case the material AA6005-T6. This is caused by the dissolution or acidification of reinforcing deposits during the welding process, which ultimately results in a decrease in the mechanical properties of the joint. UFSW can be the process of choice to overcome these limitations. This process is suitable for alloys that are sensitive to heating during welding and is widely used for HTTA. The aim of this article is to provide a comprehensive literature review regarding the current status and development of UFSW and its importance compared to WPS with the aim of discussing and summarizing various aspects of UFSW. Special attention is paid to basic principles including material flow, generation temperature, process parameters, microstructure and mechanical properties. The research results showed that the highest impact value in specimen 2 was 0.944 Joules/mm² compared to the base metal with an impact value of 0.641 Joules/mm². Micro tests on fine grains in the weld nugget (WN) area clearly show differences with a denser structure compared to the thermo-mechanically affected zone (TMAZ) which is the tool edge area or what is usually called plastic deformation in the UFSW process, which can cause zones the weld becomes stronger than in the base metal (BM) area.*

Keywords - *Underwater Friction Stir Welding (UFSW), Heat-treated aluminum alloys (HTTA; Mechanical properties, Microstructure, Fusion welding*

Abstrak. Underwater Friction Stir Welding (UFSW) merupakan suatu proses pengelasan solid state yang mampu menyatukan material dengan air yang relatif sulit untuk dilas dengan menggunakan pengelasan fusi. Selain itu, proses ini sangat hemat energi dan ramah dibandingkan dengan pengelasan fusi. Meskipun ada beberapa keunggulan UFSW dibandingkan pengelasan fusi, siklus termal yang terjadi pada UFSW dapat menyebabkan pelunakan sambungan, terutama pada Heat Treatable Aluminium Alloys (HTTA), dalam hal ini material AA6005-T6. Hal ini disebabkan oleh adanya pelarutan atau pengasaman endapan penguat pada saat proses pengelasan, yang pada akhirnya mengakibatkan penurunan sifat mekanik sambungan. UFSW dapat menjadi proses pilihan untuk mengatasi keterbatasan tersebut. Proses ini cocok untuk paduan yang sensitif terhadap pemanasan selama pengelasan dan banyak digunakan untuk HTTA. Tujuan artikel ini adalah untuk memberikan tinjauan literatur yang komprehensif mengenai status dan perkembangan UFSW saat ini serta pentingnya dibandingkan dengan WPS dengan tujuan untuk membahas dan merangkum berbagai aspek UFSW. Perhatian khusus diberikan pada prinsip-prinsip dasar termasuk aliran material, suhu pembangkitan, parameter proses, struktur mikro dan sifat mekanik. Hasil penelitian menunjukkan nilai impak tertinggi pada benda uji 2 sebesar 0,944 Joule/mm² dibandingkan logam dasar dengan nilai impak sebesar 0,641 Joule/mm². Uji mikro pada butiran halus pada area weld nugget (WN) jelas menunjukkan perbedaan dengan struktur yang lebih padat dibandingkan dengan thermo-mechanically effect zone (TMAZ) yaitu area tepi pahat atau biasa disebut dengan deformasi plastis pada proses UFSW, yang mana dapat menyebabkan zona-zona lasan menjadi lebih kuat dibandingkan pada area logam dasar (BM).

Kata Kunci - Underwater Friction Stir Welding (UFSW), Paduan aluminium yang diberi perlakuan panas (HTTA; Sifat mekanik, Struktur mikro, Pengelasan fusi

I. PENDAHULUAN

Underwater Friction Stir Welding (UFSW) telah menjadi salah satu teknik las yang paling cocok untuk menggabungkan paduan alumunium (AA), terutama pada Heat Treatable Aluminium Alloys

(HTTAs) atau aluminium alloy yang dikeraskan dengan presipitasi, yang sulit di las menggunakan metode fusion welding (FW)[1]. Namun, UFSW tidak terlepas dari masalah cacat seperti porositas, segregasi cavity, dan flash[2]. Porositas, salah satu cacat yang sering terjadi, disebabkan oleh zona pengaruh panas yang lemah dan kecepatan putar tool yang rendah, yang mengakibatkan panas yang dihasilkan tidak cukup untuk mencapai sifat mekanik yang optimal[3].

Segregasi, cacat lainnya, muncul akibat parameter yang tidak tepat, seperti kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi, yang menyebabkan pencairan logam tidak mencapai suhu ideal untuk menyatukan kedua specimen yang akan di las[4]. Hal ini dapat dipengaruhi oleh media pendinginan yang kurang tepat serta komposisi kimia paduan, yang menjadi faktor pengontrol sifat mekanik pada spesimen[5]. Selain itu, cacat cavity juga sering terjadi karena ketidaksesuaian parameter dan jenis pin tool dengan ukuran dan bahan specimen, yang mengakibatkan terbentuknya rongga pada specimen yang telah dilas[6].

Cacat flash, yang juga sering ditemukan, disebabkan oleh pemanasan suhu yang berlebihan dan penurunan suhu yang signifikan, serta oleh beban mekanis, suhu, dan deformasi plastis yang tinggi[7]. Semua cacat ini menunjukkan pentingnya pemilihan parameter yang tepat dalam proses UFSW dan kehati-hatian dalam menyesuaikan kondisi lingkungan pengelasan. Oleh karena itu, pemahaman yang lebih mendalam tentang faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya cacat diperlukan untuk meningkatkan kualitas sambungan dalam proses UFSW[8].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis berbagai cacat yang sering terjadi dalam proses UFSW pada material Aluminium 6005-T6[9]. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diketahui penyebab terjadinya cacat seperti porositas, segregasi cavity, dan flash, serta memahami faktor-faktor yang mempengaruhi kemunculan cacat tersebut[10]. Selain itu, tujuan lainnya adalah untuk mengevaluasi parameter-parameter yang digunakan dalam proses UFSW, seperti kecepatan putar tool, media pendinginan, dan komposisi kimia paduan, dengan tujuan untuk mengoptimalkan proses pengelasan dan mengurangi kemungkinan terjadinya cacat[11]. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang cacat-cacat yang mungkin terjadi dan faktor-faktor yang memengaruhinya, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan kualitas sambungan yang dihasilkan oleh proses UFSW[12].

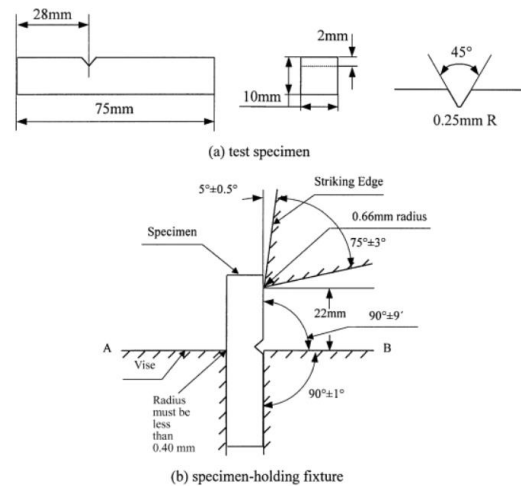
Dari pernyataan diatas dapat disimpulkan bahwa permasalahan cacat dalam proses UFSW dapat disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk parameter pengelasan yang tidak tepat, jenis dan ukuran *tool* yang digunakan komposisi kimia logam, kondisi lingkungan pengelasan serta suhu dan beban mekanis yang terlibat dalam proses tersebut[13]. Oleh karena itu, penelitian ini memvariasikan parameter proses untuk mengurangi terjadinya cacat pada sambungan UFSW material AA6006-T6[14]. Analisis dilakukan dengan pengujian kekuatan *impact* dan struktur mikro[15].

II. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dirancang secara komprehensif untuk menyelidiki pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) pada sambungan paduan aluminium seri AA6005-T6 terhadap kekuatan impact dan struktur mikro. 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 impact untuk mengevaluasi kekuatan impactnya, serta analisis struktur mikro untuk memahami karakteristik fisik sambungan. Data spesifikasi mesin uji Impact dan perhitungan energi/kekuatan Impact menggunakan metode Izod adalah sebagai berikut:

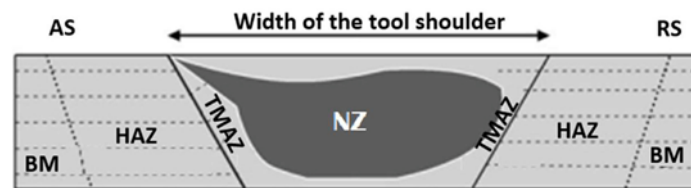
Berat pendulum (W)	: 3 kg
Radius (R)	: 980 mm
Drop Angle (α)	: 160°
Luas specimen (A)	: pxl
Energi impact (E)	: $W.R (\cos \beta - \cos \alpha)$ (joule)
Kekuatan impact (IS)	: $W.R (\cos \beta - \cos \alpha)/A$ (joule/mm ²)

Prosedur uji Izod diringkas sebagai berikut: benda uji yang ditunjukkan pada Gambar 1(a) diposisikan pada perlengkapan penahan benda uji Gambar 1(b) dan pendulum dilepaskan tanpa getaran (ASTM E23 1999). Informasi diperoleh dari mesin dan dari specimen yang rusak.



Gambar 1. Sketsa uji impak metode izod

Pengujian struktur mikro dilakukan pada berbagai bagian dari hasil proses UFSW seperti pada Gambar 2, termasuk *Base Metal* (BM), *Weld Nugget* (WN), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *Heat-Affected Zone* (HAZ), merupakan langkah penting dalam memahami perubahan mikrostruktur yang terjadi selama proses pengelasan. Dengan menganalisis struktur mikro pada setiap zona tersebut dapat mengevaluasi efek dari panas, tekanan, dan pergerakan logam cair yang terlibat dalam proses UFSW. Hasil pengujian ini memberikan wawasan yang berharga tentang perubahan mikrostruktur yang mungkin terjadi, serta memungkinkan identifikasi zona-zona kritis yang mempengaruhi sifat mekanik dan kekuatan sambungan. Oleh karena itu, pengujian mikrostruktur menjadi tahap yang krusial dalam memperoleh pemahaman yang mendalam tentang karakteristik sambungan yang dihasilkan oleh UFSW. Alat uji menggunakan mikroskop optik seperti pada Gambar 3.



Gambar 2. Daerah pengujian struktur mikro hasil UFSW



Gambar 3. Mikroskop optik merk OLYMPUS BX53M

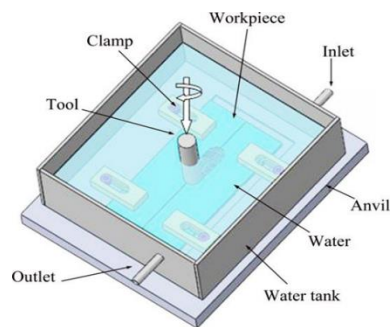
Bahan yang digunakan untuk penelitian ini yaitu aluminium AA 6005 T-6 yang berbentuk lembaran dengan panjang 160 mm, lebar 40 mm dengan ketebalan 3 mm. Bahan aluminium mempunyai komposisi kimia dan material properties seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 berikut ini.

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

Aluminium AA 6005 T-6	
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 %

**Gambar 4.** Ilustrasi proses pengelasan UFSW

Ilustrasi proses pengelasan metode UFSW seperti pada Gambar 4, menggunakan mesin milling dengan variasi putaran *spindle* 2200 rpm, kecepatan *feed* 11 mm/min² dan sudut kemiringan tool *shoulder* 3°. Tool UFSW dari bahan H-13 *Hardness Steel* dengan panjang 100 mm, dan diameter pin 4 mm berbentuk pin *hexagonal*. Tipe sambungan las *But Joint*, bentuk tool seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 dibawah ini.

**Gambar 5.** Tool UWFSW: (a) desain tool dan (b) photo manufaktur tool

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian Uji Impak

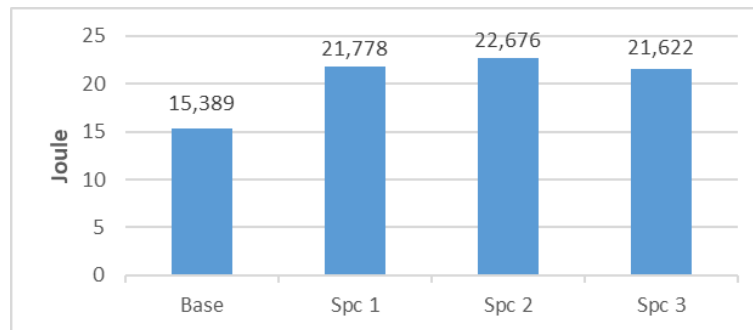
Hasil penelitian mengenai kekuatan impak dari proses UFSW yang diuji menggunakan metode izod telah direkam dan disajikan dalam Tabel 3. Di samping itu, analisis struktur mikro yang merupakan bagian integral dari penelitian ini juga telah dilakukan dan hasilnya disajikan dalam Gambar 6 dan 7 di bawah. Kombinasi data dari kedua pengujian ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang sifat mekanik dan karakteristik mikrostruktur dari sambungan yang dihasilkan melalui proses UFSW.

Tabel 3. Hasil pengujian Impak metode izod

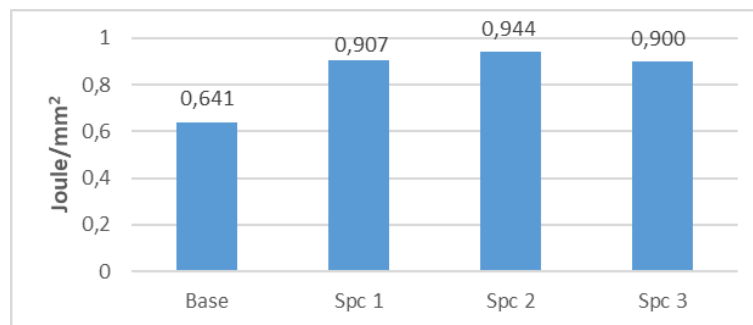
W	R	α	β	A	E	IS
(NM)	(M)	(°)	(°)	(mm ²)	(Joule)	(Joule/mm ²)

Base	29,419	0.98	160	124,5°	24	15,398	0,641
Spc1	29,419	0.98	160	142°	24	21,778	0,907
Spc2	29,419	0.98	160	145°	24	22,676	0,944
Spc3	29,419	0.98	160	141,5°	24	21,622	0,900

Gambar 6 dan 7 menampilkan hasil pengujian energi impact dan kekuatan impact pada berbagai spesimen. Didapati bahwa terdapat peningkatan nilai energi impact tertinggi mencapai 22,676 joule dan kekuatan impact sebesar 0,944 joule/mm² pada hasil pengujian keseluruhan spesimen. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengelasan UFSW mampu meningkatkan nilai impact dibandingkan dengan materi dasar (base material).

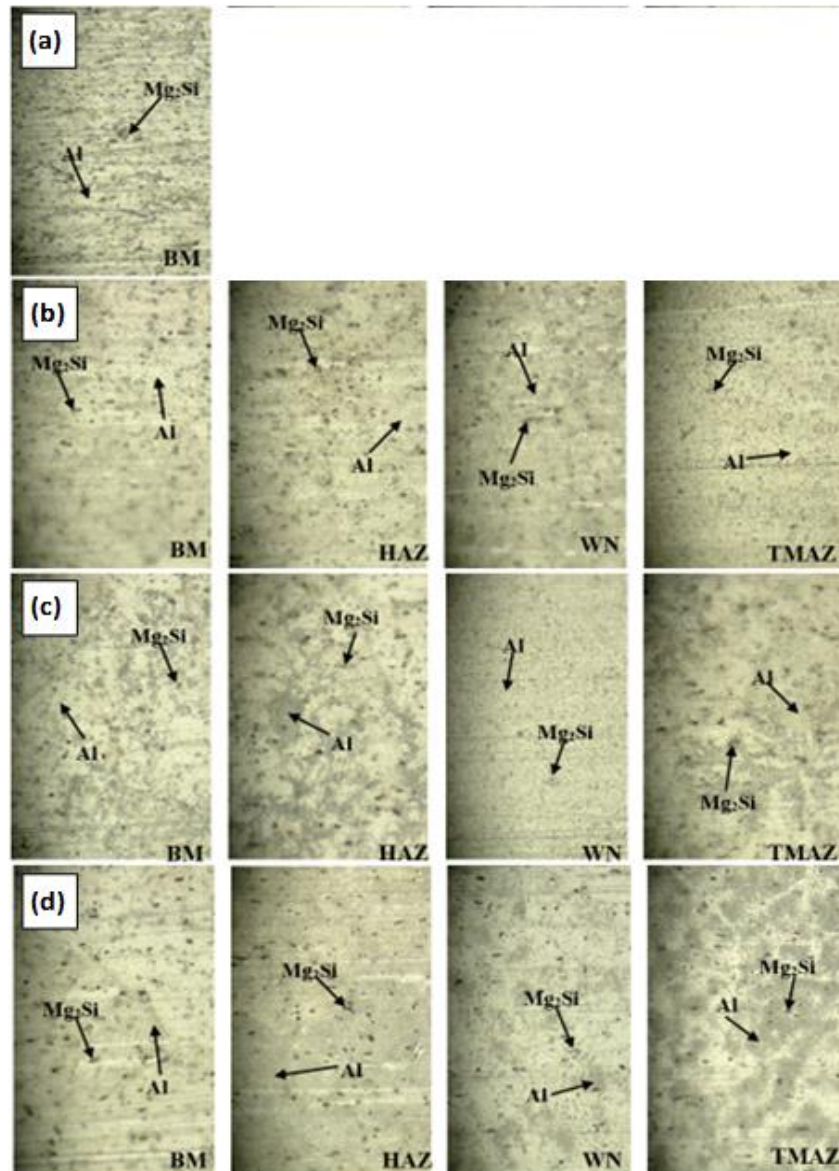


Gambar 6. Grafik nilai energi impact spesimen



Gambar 7. Grafik nilai kekuatan impact spesimen

Selain itu, hasil tersebut menunjukkan bahwa sambungan UFSW dengan putaran spindle 2200 rpm dan feed 10 mm/min menunjukkan peningkatan nilai impact yang signifikan. Ini dapat diatribusikan pada penurunan suhu yang drastis selama proses pengelasan yang terjadi di bawah air. Penurunan suhu tersebut mempengaruhi struktur mikro dan sifat mekanik sambungan, yang pada gilirannya menghasilkan peningkatan nilai impact. Hal ini menunjukkan potensi pengelasan UFSW untuk menghasilkan sambungan dengan kualitas mekanik yang unggul, terutama dalam hal kekuatan impact.



Gambar 8. Hasil uji mikrostruktur spesimen (1-4)

B. Hasil Penelitian Uji Mikro

Pengujian mikrostruktur pada hasil UFSW dilakukan di berbagai daerah, termasuk Weld Nugget (WN), Termomekanikaly Affected Zone (TMAZ), Heat Affected Zone (HAZ), dan Base Metal (BM), yang kemudian dianalisis seperti yang terlihat pada Gambar 8(a-d) atau (a=BM; b=spesimen 1; c=spesimen 2; dan d=spesimen4). Hasil dari analisis tersebut menunjukkan bahwa struktur mikro dalam daerah-daerah tersebut didominasi oleh butiran aluminium dengan ukuran relatif besar yang berwarna terang, serta beberapa butiran senyawa antar logam (Intermetallic Compound/IMC) seperti butiran Al-Mg₂-Si yang berwarna gelap. Pada daerah BM, sebaran dan kerapatan butiran Al-Mg₂-Si relatif seragam. Namun, pada daerah WN yang terpengaruh langsung oleh perubahan parameter proses, terjadi perbedaan yang signifikan baik dalam ukuran dan kerapatan butiran aluminium maupun Al-Mg₂-Si.

Perubahan signifikan dalam struktur mikro pada daerah WN, terutama pada butiran aluminium dan Al-Mg₂-Si, dapat dijelaskan oleh efek langsung dari variabilitas parameter proses pada saat pengelasan. Perubahan suhu dan laju pendinginan yang cepat selama proses pengelasan UFSW dapat mempengaruhi pembentukan butiran dan distribusi senyawa antar logam dalam sambungan. Oleh karena itu, perbedaan struktur mikro yang diamati di daerah WN dapat disebabkan oleh variasi dalam suhu, tekanan, dan laju pengadukan selama proses pengelasan. Hal ini menunjukkan pentingnya pengendalian parameter proses yang tepat untuk memastikan konsistensi dan kualitas sambungan yang dihasilkan dalam proses UFSW.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan di atas, dapat disimpulkan bahwa nilai impact pada base metal specimen, yaitu 15,398 joule, lebih rendah dibandingkan dengan specimen 2 yang mendapatkan nilai impact yang lebih besar, yaitu 21,778 joule, specimen 3 dengan nilai 22,676 joule, dan specimen 4 dengan nilai 21,622 joule, yang telah melalui proses UFSW. Proses UFSW mempercepat perubahan suhu secara signifikan, menyebabkan daerah WN mendingin secara cepat, sehingga meningkatkan nilai impak. Pada uji mikro, terlihat bahwa butiran halus pada bagian WN memiliki struktur yang lebih rapat dibandingkan dengan bagian TMAZ, yang merupakan daerah pinggir tool atau deformasi plastis selama proses UFSW. Hal ini menyebabkan WN memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bagian BM. Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut dengan variasi parameter yang berbeda guna menghasilkan hasil yang beragam antar spesimen. Selain itu, diperlukan penelitian lanjutan dengan menggunakan variasi pin tool selain pin hexagonal untuk memperluas pemahaman tentang pengaruh berbagai bentuk alat pada proses UFSW.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya ucapkan terimakasih kepada kedua orang tua yang telah mensupport dengan baik dan selalu mendoakan saya agar penelitian ini berjalan dengan baik. Serta saya ucapkan terimakasih juga kepada teman seperjuangan di PSTM Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah memberi wawasan serta ilmu yang sangat bermanfaat. Tidak lupa juga saya ucapkan terimakasih kepada dosen pembimbing saya yang telah mendukung serta membantu menyelesaikan penelitian ini.

REFRENSI

- [1] I. Sabry, A.-H. Mourad, and D. Thomas Thekkuden, "Comparison of Mechanical Characteristics of Conventional and Underwater Friction Stir Welding of AA 6063 Pipe Joints," *Int. Rev. Mech. Eng.*, vol. 14, p. 64, Jan. 2020, doi: 10.15866/ireme.v14i1.17483.
- [2] S. Pal, R. Mahto, R. Kumar, and S. Pal, "Characterizations of weld defects, intermetallic compounds and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar alloys," *Mater. Charact.*, vol. 160, p. 110115, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.matchar.2019.110115.
- [3] T. Kawakubo and K. Ushioda, "Grain boundary segregation and toughness of friction-stir-welded high-phosphorus weathering steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 832, p. 142350, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.msea.2021.142350.
- [4] R. Mahto, A. Dutta, and D. Mishra, *Prediction of Weld Defects in Underwater Friction Stir Welding of Dissimilar Materials*. 2022. doi: 10.1115/MSEC2022-85574.
- [5] E. Akinlabi and R. Mahamood, "Introduction to Friction Welding, Friction Stir Welding and Friction Stir Processing," 2020, pp. 1–12. doi: 10.1007/978-3-030-37015-2_1.
- [6] F. Darsono, S. T. Koin, K. Kriswanto, A. Thomas, R. Widodo, and Rusiyanto, "Effect of Pin Profile Tool on Friction Stir Welding Aluminium," *E3S Web Conf.*, vol. 465, Dec. 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202346501001.
- [7] R. Ranjan *et al.*, "Classification and identification of surface defects in friction stir welding: An image processing approach," *J. Manuf. Process.*, vol. 22, pp. 237–253, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.jmapro.2016.03.009.
- [8] D. Kusuma *et al.*, "PENGARUH DIAMETER TOOL SHOULDER TERHADAP METALURGI ALUMINIUM SERI 5083 DENGAN PROSES FRICTION STIR WELDING".
- [9] Mulyadi, R. Firdaus, and R. Untari, "Optimization of Friction Stir Welding Parameters for AA6061-T651 Aluminum Alloy: Defect Analysis and Process Improvement," *Acad. Open*, vol. 8, Jul. 2023, doi: 10.21070/acopen.8.2023.6665.
- [10] R. Mahto, C. Gupta, M. Kinjawadekar, A. Meena, and S. Pal, "Weldability of AA6061-T6 and AISI 304 by underwater friction stir welding," *J. Manuf. Process.*, vol. 38, pp. 370–386, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.01.028.
- [11] R. Raka Priambadha, "Percobaan Proses Underwater Friction Welding Dengan Baja St 41," *J. Tek. Mesin S-I*, vol. 10, no. 3, pp. 295–300, 2022.

- [12] R. Roy *et al.*, "Weld defect identification in friction stir welding through optimized wavelet transformation of signals and validation through X-ray micro-CT scan," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 99, Oct. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2519-3.
- [13] T. Tarmizi, R. Indrawan, and I. Irfan, "PENGARUH TOOL ROTATION SPEED TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN ALUMINIUM PADUAN 6061-T6 PADA PROSES FRICTION STIR WELDING," *Urania J. Ilm. Daur Bahan Bakar Nukl.*, vol. 25, Oct. 2019, doi: 10.17146/urania.2019.25.3.5703.
- [14] P. Sudargo, B. Margono, E. Suryono, and I. Arsita, "PENGARUH FEEDRATE TERHADAP PENGUJIAN UJI TARIK DAN STRUKTUR MIKRO SAMBUNGAN SEJENIS ALUMINIUM 7075 DENGAN METODE FRICTION STIR WELDING," *Teknika*, vol. 7, pp. 1–6, Apr. 2021, doi: 10.52561/teknika.v7i1.115.
- [15] G. Padhy, C. S. Wu, and S. Gao, "Friction stir based welding and processing technologies - processes, parameters, microstructures and applications: A review," *J. Mater. Sci. Technol. -Shenyang-*, vol. 34, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.jmst.2017.11.029.