

PENGARUH VARIASI *OFFSET* TERHADAP KARAKTERISTIK KEKERASAN HASIL PENGELASAN *SIMULTANEOUS DOUBLE-SIDED FRICTION STIR WELDED* ALUMINIUM AA6061-T6 DENGAN GEOMETRI PIN SEGITIGA

*Febrina Aulia Sukma¹, Sulardjaka², Norman Iskandar²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: sukmafebri951@gmail.com

Abstrak

Aluminium Aluminium paduan AA6061-T6 banyak digunakan pada aplikasi struktural karena memiliki kekuatan tinggi, bobot ringan, dan ketahanan korosi yang baik. Namun, pengelasan fusi konvensional sering menimbulkan cacat internal, distorsi termal, serta penurunan sifat mekanik pada daerah las. Sebagai alternatif, metode *Simultaneous Double-Sided Friction Stir Welding* (SDFSW) dikembangkan untuk menghasilkan sambungan berkualitas melalui proses *solid-state welding*. Meskipun demikian, kajian mengenai pengaruh variasi *offset* geometri pin terhadap karakteristik kekerasan sambungan SDFSW masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi *offset* pin segitiga sebesar 2 mm dan 4 mm terhadap distribusi *microhardness Vickers* sambungan SDFSW aluminium AA6061-T6 dengan dukungan pengujian radiografi dan mikrografi. Hasil radiografi menunjukkan bahwa kedua variasi *offset* bebas dari cacat internal signifikan. Distribusi kekerasan memperlihatkan profil berbentuk “W” dengan nilai *base metal* sekitar 90–95 VHN dan nilai minimum pada zona HAZ sebesar 45–58 VHN akibat fenomena HAZ *softening*. Pada zona *stir zone* (SZ), nilai kekerasan berada pada kisaran 60–72 VHN. Meskipun perbedaan nilai kekerasan antara *offset* 2 mm dan 4 mm relatif kecil, *offset* 4 mm menunjukkan distribusi kekerasan yang lebih stabil dan homogen, yang berkorelasi dengan mikrostruktur zona adukan yang lebih seragam. Secara umum, variasi *offset* 4 mm menghasilkan karakteristik distribusi kekerasan yang lebih konsisten pada sambungan SDFSW aluminium AA6061-T6.

Kata kunci: aa6061-t6; mikrostruktur; *offset*; sdfs; uji kekerasan

Abstract

AA6061-T6 aluminum alloy is widely used in structural applications due to its high strength, low weight, and good corrosion resistance. However, conventional fusion welding often leads to internal defects, thermal distortion, and degradation of mechanical properties in the weld region. As an alternative, the *Simultaneous Double-Sided Friction Stir Welding* (SDFSW) method has been developed to produce higher-quality joints through a *solid-state welding* process. Nevertheless, studies on the effect of pin geometry offset variations on the hardness characteristics of SDFSW joints remain limited. This study aims to analyze the effect of triangular pin offset variations of 2 mm and 4 mm on the *Vickers microhardness* distribution of SDFSW joints in AA6061-T6 aluminum, supported by radiographic testing and micrographic observations. Radiographic results indicate that both offset variations are free from significant internal defects. The hardness distribution exhibits a typical “W-shaped” profile, with base metal hardness around 90–95 VHN and the lowest hardness in the HAZ ranging from 45–58 VHN due to HAZ *softening*. In the *stir zone* (SZ), the hardness values range from 60–72 VHN. Although the difference in hardness values between the 2 mm and 4 mm offsets is relatively small, the 4 mm offset shows a more stable and homogeneous hardness distribution, which correlates with a more uniform microstructure in the *stir zone*. Overall, the 4 mm offset provides a more consistent hardness distribution in SDFSW joints of AA6061-T6 aluminum.

Keywords : aa6061-t6; hardness testing; microstructure; *offset*; sdfs

1. Pendahuluan

Aluminium paduan AA6061 banyak digunakan pada aplikasi struktural karena memiliki kombinasi kekuatan mekanik yang baik, bobot ringan, dan ketahanan korosi yang tinggi [1]. Namun, proses pengelasan fusi konvensional pada aluminium sering menimbulkan cacat internal, distorsi termal, serta penurunan sifat mekanik terutama pada daerah *heat affected zone* (HAZ) [2]. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dikembangkan metode *Friction Stir Welding* (FSW) dan pengembangannya, yaitu *Simultaneous Double-Sided Friction Stir Welding* (SDFSW), yang mampu menghasilkan sambungan berkualitas melalui proses *solid-state welding* dengan homogenitas struktur yang lebih baik serta deformasi termal yang lebih rendah [2], [3], [4].

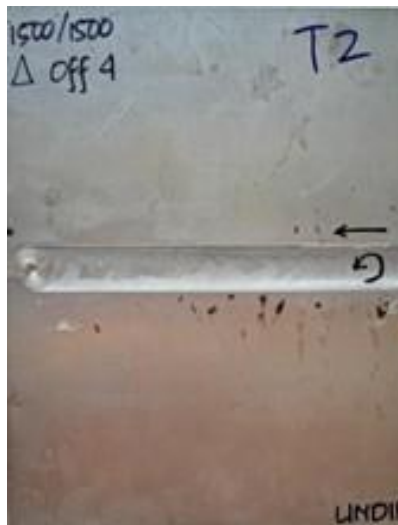
Kualitas sambungan SDFSW sangat dipengaruhi oleh parameter proses, khususnya variasi *offset* geometri pin yang berperan dalam mengontrol distribusi panas, aliran material, dan evolusi mikrostruktur pada zona sambungan,

yang selanjutnya berdampak langsung terhadap distribusi kekerasan material [3], [4]. Meskipun demikian, kajian yang secara khusus membahas pengaruh variasi *offset* geometri pin segitiga terhadap karakteristik distribusi kekerasan sambungan SDFSW aluminium AA6061-T6 masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh variasi *offset* terhadap distribusi kekerasan sambungan SDFSW aluminium AA6061-T6 dengan dukungan pengujian radiografi dan mikrografi.

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1 Material dan Pahat

Spesimen yang digunakan dalam studi ini adalah dua pelat aluminium AA6061-T6 dengan ketebalan 8 mm yang dipreparasi menjadi dimensi 250 mm × 125 mm. Proses pengelasan menggunakan pahat berbahan baja SKD11 yang memiliki profil *shoulder* datar dan pin segitiga. Parameter pengelasan ditetapkan pada kecepatan rotasi 1500 rpm dengan menerapkan dua variasi *offset*, yaitu 2 mm dan 4 mm. Visualisasi pelat AA6061-T6 tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Plat AA6061-T6

2.2 Pengelasan *Simultaneous Double-Sided Friction Stir Welding*

Pelaksanaan pengelasan dilakukan menggunakan mesin SDFSW Yeong Chin yang memiliki kapasitas beban puncak mencapai 100 kN. Sepasang pelat AA6061-T6 dipasang pada meja mesin menggunakan sistem pengekaman (*clamping*) yang rigid guna meminimalkan pergeseran material saat proses berlangsung. Jarak longitudinal antar perkakas dikonfigurasi berdasarkan variasi *offset* yang ditentukan, yakni 2 mm dan 4 mm. Selain itu, kecepatan *traverse* ditetapkan sebesar 100 mm/menit sesuai dengan standar operasional FSW untuk paduan aluminium. Guna menjaga stabilitas proses, suhu permukaan dipantau secara berkala menggunakan termogun untuk memastikan distribusi panas tetap berada pada rentang optimal.

2.3 Pengujian Radiografi

Pengujian radiografi dilakukan sebagai metode *non-destructive testing* (NDT) untuk mendeteksi cacat internal pada sambungan SDFSW tanpa merusak spesimen. Pengujian menggunakan perangkat Sentinel 880 Series Delta dengan sumber radiasi isotop Ir-192. Spesimen disinari sinar gamma untuk menghasilkan citra internal sambungan yang dianalisis guna mengidentifikasi diskontinuitas seperti porositas dan *tunnel defect*. Evaluasi kualitas sambungan didasarkan pada homogenitas densitas citra radiografi, di mana distribusi yang seragam menunjukkan kualitas sambungan yang baik [5],[6].

2.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan *Vickers* (HV), salah satu metode yang banyak digunakan karena presisinya dan kemampuannya mendeteksi variasi kekerasan pada skala mikro [7], dilakukan menggunakan mesin Shimadzu HMV-2000 dengan presisi indentasi ±0,01 mm sesuai standar ASTM E384. Pengukuran dilakukan pada beberapa titik sepanjang garis sambungan dengan jarak antar titik 1 mm, menggunakan beban 300 gf dan waktu indentasi 12 detik. Tiga lintasan horizontal diukur, yaitu bagian atas, tengah, dan bawah, dengan minimal lima pengulangan pada setiap titik untuk memastikan akurasi data. Nilai HV dihitung menggunakan persamaan standar $HV = 1,8544 \times F / d^2$, di mana F adalah beban dalam kgf dan d merupakan rata-rata diagonal indentasi dalam mm. Hasil pengujian kemudian diplot dalam grafik kekerasan versus posisi untuk memvisualisasikan distribusi kekerasan di seluruh zona sambungan.

2.5 Pengujian Makrografi dan Mikrografi

Spesimen untuk pengamatan mikro dan makro dipersiapkan melalui tahap pengamplasan bertingkat menggunakan kertas abrasif hingga grit 2000, dilanjutkan pemolesan dengan pasta autosol hingga permukaan halus dan mengkilap [8], [9]. Setelah itu, spesimen di-tsa menggunakan larutan HF dan aquades selama beberapa menit, kemudian dibilas dan dikeringkan. Pengamatan mikrografi dilakukan menggunakan mikroskop optik pada berbagai perbesaran untuk menganalisis zona las, yaitu *base metal* (BM), *heat affected zone* (HAZ), *thermomechanically affected zone* (TMAZ), dan *stir zone* (SZ), dengan fokus pada karakteristik butir, orientasi, dan batas zona. Sementara itu, pengamatan makrografi digunakan untuk menilai distribusi zona las dan homogenitas sambungan [8].

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengelasan

Hasil visual pengelasan menunjukkan gambar hasil pengelasan SDFS_W variasi *offset* 4 mm yang ditunjukkan pada Gambar 2.

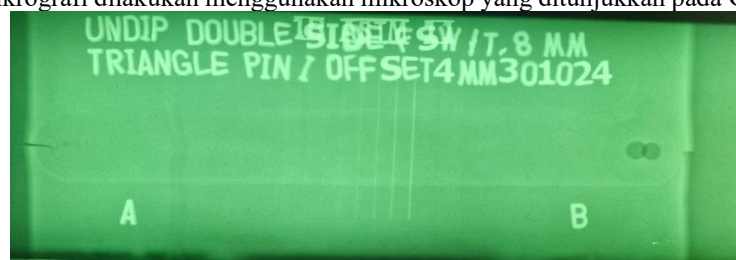


Gambar 2. Hasil pengelasan SDFS_W *offset* 4 mm

Hasil Analisis morfologi permukaan sambungan pada spesimen SDFS_W menunjukkan perbedaan karakteristik antara *offset* 2 mm dan 4 mm. Pada *offset* 2 mm, jalur adukan di sisi atas dan bawah tampak halus, seragam, dan kontinu, dengan jejak aliran material yang lebih terkontrol dan tekstur permukaan homogen di kedua sisi AS dan RS, menunjukkan distribusi panas dan deformasi plastis yang seimbang sepanjang ketebalan pelat. Sebaliknya, pada *offset* 4 mm, meskipun jalur adukan tetap kontinu tanpa cacat makroskopik signifikan, tekstur permukaan terlihat sedikit lebih kasar, terutama di sisi bawah, yang menandakan adanya perubahan mekanisme aliran plastis dan distribusi panas akibat posisi pahat yang menjauhi garis tengah sambungan. Tekstur lebih kasar ini bukan merupakan cacat pengelasan, melainkan konsekuensi alami dari kondisi termomekanik yang berbeda selama proses SDFS_W [10].

3.2 Hasil Pengujian Radiografi

Hasil pengujian mikrografi dilakukan menggunakan mikroskop yang ditunjukkan pada Gambar 3.

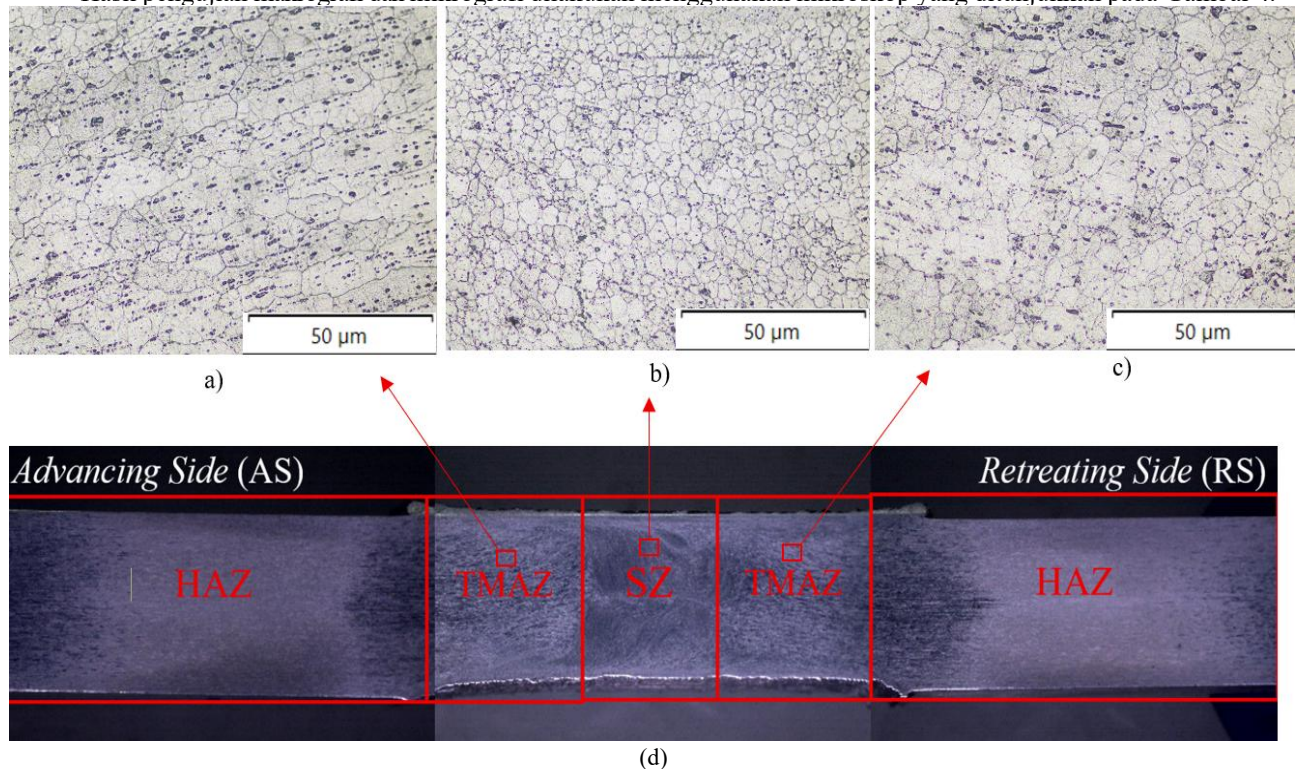


Gambar 3. Hasil pengujian radiografi spesimen *offset* 4 mm

Hasil pengujian radiografi (Gambar 3) pada spesimen SDFS_W dengan *offset* 2 mm dan 4 mm menunjukkan tidak adanya cacat internal signifikan, seperti *tunnel defect*, porositas, *lack of fusion*, maupun *incomplete penetration*, serta memperlihatkan distribusi densitas material yang homogen sepanjang garis sambungan [1]. Kondisi ini menegaskan bahwa kedua variasi *offset* tersebut, bersama dengan parameter proses lainnya, berada pada rentang optimal, sehingga aliran plastis material dan distribusi panas memadai untuk memastikan pengisian rongga secara sempurna dan meminimalkan risiko cacat internal. Temuan ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menekankan efektivitas radiografi sebagai metode NDT yang andal untuk menilai integritas internal sambungan, khususnya pada pengelasan paduan aluminium [6].

3.3 Hasil Pengujian Makrografi dan Mikrografi

Hasil pengujian makrografi dan mikrografi dilakukan menggunakan mikroskop yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil pengujian mikrografi a) zona TMAZ AS, b) zona SZ, c) zona TMAZ RS, d) hasil pengujian makrografi

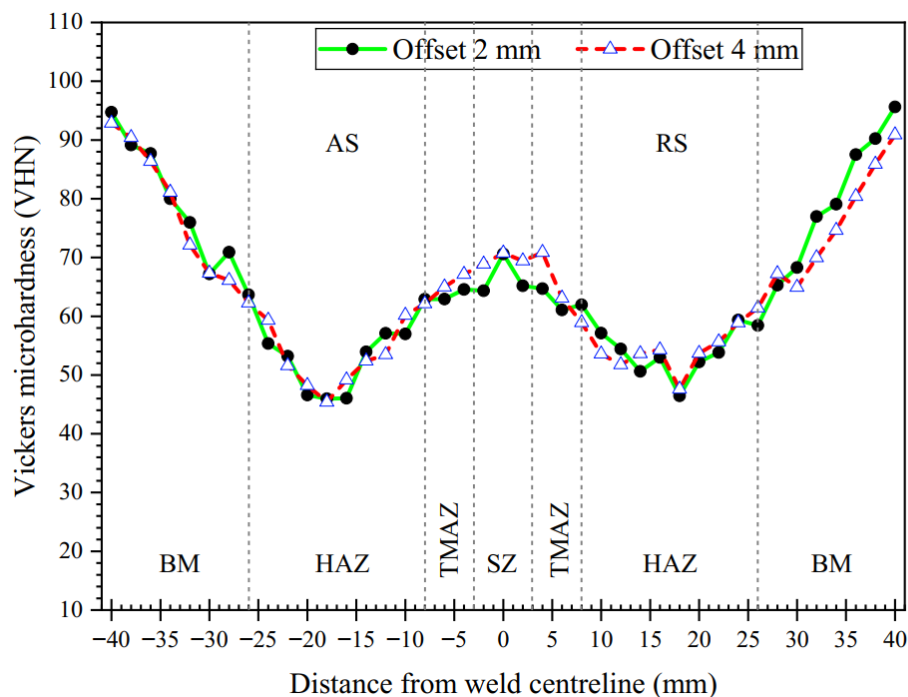
Analisis makrostruktur dan mikrostruktur sambungan SDFSWS menunjukkan adanya distribusi zona khas, yaitu HAZ, TMAZ, dan SZ, yang simetris terhadap garis tengah sambungan, baik pada *offset* 2 mm maupun 4 mm [11]. Pada *offset* 2 mm, jalur adukan permukaan relatif halus, seragam, dan kontinu, dengan zona SZ menampilkan butiran halus namun distribusi ukuran butir sedikit lebih bervariasi, mengindikasikan aliran material dan deformasi plastis yang lebih terfokus di sekitar garis tengah sambungan. Sebaliknya, *offset* 4 mm menghasilkan jalur adukan yang tetap kontinu dengan tekstur sedikit lebih kasar, sementara zona SZ menunjukkan butiran halus berbentuk equiaxed yang lebih homogen dan terdistribusi merata, menandakan plastisasi material yang berlangsung lebih stabil serta mekanisme pencampuran yang lebih efektif di sekitar lintasan pahat [1].

Zona TMAZ pada kedua *offset* memperlihatkan butiran terdistorsi akibat kombinasi efek termal dan mekanik selama proses pengadukan. Namun, pada *offset* 2 mm distorsi butir cenderung lebih tajam dengan batas zona yang lebih kontras akibat gradien panas dan deformasi yang lebih terlokalisasi, sedangkan pada *offset* 4 mm gradien termal terlihat lebih lembut sehingga transisi antara SZ–TMAZ–HAZ tampak lebih gradual dan kontinu [2]. Pada zona HAZ, kedua variasi *offset* hanya mengalami pengaruh siklus termal tanpa deformasi plastis yang signifikan; meskipun demikian, *offset* 2 mm menunjukkan kecenderungan pertumbuhan butir yang lebih jelas serta perubahan kontras yang lebih tegas dibandingkan *offset* 4 mm yang mempertahankan ukuran butir relatif lebih terkendali dan seragam [12].

Selain itu, keberadaan pola *onion ring* pada SZ yang tampak pada kedua variasi *offset* mengindikasikan terjadinya deposisi material plastis secara berlapis selama rotasi pin, yang mencerminkan stabilitas aliran material dan konsistensi proses pengadukan tanpa ditemukannya cacat makroskopik pada penampang sambungan [13]. Perbedaan karakteristik mikrostruktur ini juga berkaitan dengan distribusi panas dan intensitas deformasi plastis selama proses SDFSWS, di mana kondisi adukan yang lebih stabil cenderung menghasilkan struktur *nugget* yang lebih homogen, batas antar zona yang lebih jelas, serta integritas sambungan yang tetap terjaga sepanjang lintasan las.

3.4 Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Vickers* dan hasilnya diolah dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil pengujian kekerasan *Vickers* bagian tengah pada sambungan SDFSWS variasi *offset* 2 mm dan *offset* 4 mm

Pengujian kekerasan *Vickers* pada bagian tengah (*middle*) sambungan SDFSWS menunjukkan pola distribusi berbentuk “W” untuk kedua variasi *offset* 2 mm dan 4 mm, yang merupakan karakteristik umum pada paduan aluminium hasil FSW [1]. Nilai kekerasan di *base metal* relatif tinggi dan seragam, berada di kisaran 90–95 VHN, menandakan kondisi mikrostruktur awal yang tidak terpengaruh oleh siklus termal maupun deformasi plastis. Pada zona HAZ, terjadi penurunan tajam dengan nilai minimum sekitar 46–48 VHN untuk *offset* 2 mm dan 45–47 VHN untuk *offset* 4 mm, mencerminkan fenomena HAZ *softening* akibat paparan panas yang memicu pertumbuhan butir dan relaksasi tegangan internal tanpa deformasi plastis signifikan.

Nilai kekerasan kemudian meningkat kembali pada zona TMAZ, menunjukkan pengaruh kombinasi panas dan deformasi plastis yang menghasilkan rekristalisasi parsial serta struktur butir yang lebih terdistorsi dibandingkan *base metal* [2]. Di zona *nugget* (SZ), *offset* 2 mm menunjukkan nilai kekerasan 60–72 VHN dengan distribusi ukuran butir yang sedikit lebih bervariasi, sedangkan *offset* 4 mm berada pada kisaran 62–72 VHN dengan butiran yang lebih halus dan homogen, yang mengindikasikan intensitas deformasi plastis serta mekanisme pencampuran material yang lebih stabil di sekitar lintasan pin [14]. Selain itu, fluktuasi kekerasan pada *offset* 4 mm cenderung lebih terkendali di sepanjang lintasan pengujian, menandakan distribusi panas dan aliran material yang lebih merata selama proses pengelasan. Perbedaan karakteristik ini memperlihatkan bahwa peningkatan *offset* berkontribusi terhadap homogenitas zona adukan dan kestabilan distribusi kekerasan, meskipun secara umum kedua variasi *offset* masih menghasilkan pola distribusi kekerasan yang konsisten dan mencerminkan integritas mekanik sambungan yang baik. perbedaan posisi pahat.

4. Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil penelitian yang telah diperoleh, kesimpulan yang bisa diambil adalah:

1. Pengujian radiografi menunjukkan bahwa sambungan SDFSWS dengan variasi *offset* 2 mm dan 4 mm tidak memperlihatkan adanya cacat internal signifikan, seperti porositas maupun *tunnel defect*. Hal ini menandakan bahwa kedua variasi *offset* mampu menghasilkan integritas internal sambungan yang baik dan proses pengelasan berlangsung secara stabil.
2. Pengamatan makrostruktur dan mikrostruktur menunjukkan terbentuknya zona khas FSW, yaitu HAZ, TMAZ, dan SZ, yang tersusun simetris terhadap garis tengah sambungan pada kedua variasi *offset*. *Offset* 4 mm memperlihatkan zona adukan dengan butiran lebih homogen dan distribusi panas yang lebih merata, sedangkan *offset* 2 mm menunjukkan gradien deformasi dan pertumbuhan butir yang sedikit lebih terfokus.
3. Pengujian kekerasan *Vickers* memperlihatkan pola distribusi berbentuk “W” pada kedua variasi *offset*, dengan nilai kekerasan *base metal* sekitar 90–95 VHN, penurunan minimum pada HAZ sebesar 45–58 VHN akibat fenomena HAZ *softening*, serta peningkatan kembali pada zona SZ sebesar 60–72 VHN. *Offset* 4 mm menunjukkan distribusi kekerasan yang lebih stabil dan homogen di zona adukan dibandingkan *offset* 2 mm.

5. Daftar Pustaka

- [1] Hendrato, P. Puspitasari, Jamasri, and Triyono, "Fatigue crack growth rate and mechanical properties of one-step double-side friction stir welded AA6061-T6," *Results in Engineering*, vol. 21, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101958.
- [2] N. Muhayat *et al.*, "Apparatus Design of One-Step Double-Side Friction Stir Welding for Aluminum Plates," *Designs (Basel)*, vol. 7, no. 3, Jun. 2023, doi: 10.3390/designs7030075.
- [3] R. Kumar, S. Varghese, and M. Sivapragash, "A comparative study of the mechanical properties of single and double sided friction stir welded aluminium joints," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2012, pp. 3951–3961. doi: 10.1016/j.proeng.2012.06.452.
- [4] I. HEJAZI and S. E. MIRSALEHI, "Effect of pin penetration depth on double-sided friction stir welded joints of AA6061-T913 alloy," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 26, no. 3, pp. 676–683, Mar. 2016, doi: 10.1016/S1003-6326(16)64158-4.
- [5] S. Tunde Azeez and P. Madindwa Mashinini, "Radiography examination of friction stir welds of dissimilar aluminum alloys," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2022, pp. 3070–3075. doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.225.
- [6] Hendrato *et al.*, "Fatigue crack growth and residual stress in simultaneous double-sided friction stir welded aluminum alloy AA6061-T6," *Journal of Advanced Joining Processes*, vol. 11, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jajp.2025.100300.
- [7] D. Sofyan Arief *et al.*, "Mechanical and Aerospace-Science and Engineering-30 th," *Journal of Ocean*, vol. 64, no. 3, pp. 81–87, 2020, [Online]. Available: www.isomase.org.
- [8] Z. Chen, S. Li, and L. H. Hihara, "Microstructure, mechanical properties and corrosion of friction stir welded 6061 Aluminum Alloy," 2015.
- [9] F. Fadaeifard, K. A. Matori, S. Abd Aziz, L. Zolkarnain, and M. A. Z. Bin Abdul Rahim, "Effect of the welding speed on the macrostructure, microstructure and mechanical properties of AA6061-T6 friction stir butt welds," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 2, Feb. 2017, doi: 10.3390/met7020048.
- [10] Y. E. Widyantono *et al.*, "Comparative analysis of bobbin tool and one-step double-acting tool in friction stir welding of aluminum AA1100," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 8, no. 5, pp. 577–594, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.ijlmm.2025.05.002.
- [11] Rajiv S and M. W. Mishra, "Friction Stir Welding and Processing," 2007, doi: DOI:10.1361/fswp2007p001.
- [12] Y. Liu *et al.*, "Mechanical properties, microstructure evolution, and strengthening mechanism of Al-Mg-Si alloy welded joints using double-sided friction stir welding," *European Journal of Mechanics, A/Solids*, vol. 117, May 2026, doi: 10.1016/j.euromechsol.2025.105987.
- [13] D. Lohwasser and Z. Chen, *Friction Stir Welding*. Woodhead Pub. : Maney Pub., 2010.
- [14] A. Alkhafaji, D. Camas, and H. Al-Asadi, "Static and Fatigue Strength of Graphene Nanoplatelet-Reinforced AA6061-T6 Friction Stir Spot-Welded Lap Joints," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, no. 3, Mar. 2025, doi: 10.3390/jmmp9030098.