

## PENGARUH VARIASI OFFSET TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN KEKERASAN PADA MATERIAL AA6061 HASIL PENGELASAN ONE STEP DOUBLE SIDE FRICTION STIR WELDING

\*Elroy Efodiarlo Umbu Lolo<sup>1</sup>, Sulardjaka<sup>2</sup>, Norman Iskandar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: [elroyefodiarlo@gmail.com](mailto:elroyefodiarlo@gmail.com)

### Abstrak

Paduan aluminium seri 6000, khususnya tipe AA6061, banyak dimanfaatkan pada sektor otomotif, kedirgantaraan, dan konstruksi teknik karena perpaduan sifatnya yang unggul. Namun, proses penyambungan material ini tidaklah mudah, karena rentan mengalami berbagai cacat pengelasan apabila menggunakan metode pengelasan fusi konvensional. *Friction Stir Welding* (FSW) hadir sebagai solusi yang mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas tinggi tanpa mencairkan logam dasar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *offset* terhadap kekuatan tarik dan kekerasan pada spesimen AA6061-T6 hasil pengelasan *one-step double side friction stir welding*. Variasi *offset* yang digunakan adalah 2 mm dengan kecepatan rotasi pahat 1500 rpm menggunakan pahat berbentuk lingkaran. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian, mikrofografi, kekerasan Vickers, dan tarik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *offset* 2 mm menghasilkan sambungan dengan kualitas yang baik. Struktur mikro pada *offset* 2 mm menampilkan butir yang halus dan seragam di zona aduk hasil rekristalisasi dinamis. Distribusi kekerasan *offset* 2 mm homogen dengan nilai sekitar 70 VHN di zona aduk. Kekuatan tarik maksimum *offset* 2 mm didapatkan sebesar 148 MPa dan kekuatan luluhnya sebesar 108 MPa. Secara keseluruhan, *offset* 2 mm direkomendasikan untuk aplikasi komponen struktural dengan beban siklik berulang karena memberikan keseimbangan optimal antara kekuatan statis dan ketahanan lelah.

**Kata kunci:** aa6061; *double side friction stir welding*; *offset*; uji kekerasan; uji tarik

### Abstract

The 6000 series aluminum alloys, particularly AA6061, are widely utilized in the automotive, aerospace, and structural engineering sectors due to their excellent combination of mechanical strength, corrosion resistance, and formability. However, joining this material is challenging, as it is prone to various welding defects when conventional fusion welding methods are applied. Friction Stir Welding (FSW) emerges as an effective solution capable of producing high-quality joints without melting the base metal. This study aims to analyze the effect of offset variation on the tensile strength and hardness of AA6061-T6 specimens welded using the one-step double side friction stir welding method. The offset variation used was 2 mm, with a tool rotational speed of 1500 rpm and a cylindrical tool profile. The tests conducted included micrographic examination, Vickers hardness testing, and tensile testing. The results show that the 2 mm offset produced joints with superior quality. The microstructure at this offset exhibited fine and uniform grains in the stir zone as a result of dynamic recrystallization. The hardness distribution at 2 mm offset was homogeneous, with an average value of approximately 70 VHN in the stir zone. The maximum tensile strength achieved was 148 MPa, with a yield strength of 108 MPa. Overall, the 2 mm offset is recommended for structural component applications under cyclic loading, as it provides an optimal balance between static strength and fatigue resistance.

**Keywords :** aa6061; *double side friction stir welding*; hardness test; *offset*; tensile test

### 1. Pendahuluan

Aluminium AA6061 banyak digunakan dalam industri otomotif, dirgantara, dan struktur rekayasa karena kombinasi baik antara kekuatan mekanik, ketahanan korosi, dan kemudahan fabrikasi [1], [2]. Namun, pengelasan material ini menghadirkan tantangan berupa cacat las dan hilangnya kekuatan pada *Heat Affected Zone* (HAZ) ketika menggunakan metode pengelasan fusi konvensional [3]. *Friction Stir Welding* (FSW) hadir sebagai solusi menghasilkan sambungan berkualitas tinggi tanpa mencairkan logam dasar [4], [5]. *Double-Side Friction Stir Welding* (DS-FSW) dikembangkan

menghasilkan penyambungan lebih simetris [6], [7]. DS-FSW terbukti menghasilkan kekuatan sambungan hingga 41% lebih besar dibanding FSW satu sisi [8]. Parameter *offset* dalam DS-FSW memiliki peran penting yang belum banyak diteliti, namun dapat memengaruhi distribusi panas, aliran material, dan sifat mekanik sambungan [9], [10]. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi *offset* terhadap sifat mekanik dan laju perambatan retak lelah (FCGR) pada sambungan *one-step* DSFSW material AA6061, serta menentukan nilai *offset* optimal untuk aplikasi komponen struktural dengan beban siklik.

## 2. Bahan dan Metode Penelitian

### 2.1 Material dan Pahat

Penelitian menggunakan gabungan dari dua material aluminium AA6061-T6 ketebalan 8 mm yang dipotong menjadi plat 250 mm × 125 mm. Pahat terbuat dari baja SKD11 dengan *shoulder* datar dan pin berbentuk lingkaran. Kecepatan rotasi 1500 rpm dengan dua variasi *offset*: 2 mm dan 4 mm. Plat AA6061-T6 yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Plat AA6061-T6

### 2.2 Pengelasan One-Step Double Side Friction Stir Welding

Proses pengelasan dilakukan menggunakan mesin DS-FSW Yeong Chin dengan kapasitas beban maksimum 100 kN. Dua plat AA6061-T6 diposisikan dan diklem pada mesin DS-FSW dengan sistem clamping yang kuat untuk mencegah pergerakan material selama proses pengelasan. Jarak antara dua tool diatur sesuai dengan nilai *offset* yang diinginkan yaitu 2 dan 4 mm. Proses pengelasan dilakukan dengan kecepatan *traverse* 100 mm/menit yang ditentukan berdasarkan rekomendasi standar FSW untuk material aluminium. Selama proses pengelasan, temperatur permukaan dimonitor menggunakan *thermogun* untuk memastikan temperatur berada dalam rentang optimal.

### 2.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan Vickers dilakukan menggunakan mesin Shimadzu HMV-2000 dengan presisi indentasi ±0.01 mm berdasarkan standar ASTM E384 [11]. Pengujian dilakukan pada berbagai titik melintasi garis sambungan dengan jarak antar titik 1 mm. Beban yang digunakan adalah 300 gf dengan waktu indentasi 12 detik. Pengujian dilakukan pada tiga lintasan horizontal: bagian atas, bagian tengah, dan bagian bawah. Minimum lima pengulangan dilakukan pada setiap titik untuk memastikan akurasi data. Nilai kekerasan Vickers (HV) dihitung menggunakan formula standar:  $HV = 1.8544 \times F / d^2$ , di mana F adalah beban dalam kgf dan d adalah rata-rata diagonal jejak indentasi dalam mm. Hasil pengujian diplotkan dalam grafik kekerasan vs posisi untuk visualisasi distribusi kekerasan di seluruh zona sambungan.

### 2.4 Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan menggunakan mesin uji tarik Gotech GT-7001-LC10 dengan kapasitas beban maksimum 10 ton. Spesimen uji tarik dibebani secara uniaksial sesuai dengan standar ASTM E8M. Sebelum pengujian, dimensi dari setiap spesimen diukur dengan akurat menggunakan jangka sorong untuk menghitung elongasi yang tepat. Data beban dan perpanjangan dicatat secara otomatis oleh perangkat lunak mesin uji [12]. Dari data beban-perpanjangan, kurva tegangan-regangan diplot untuk analisis lebih lanjut mengenai perilaku elastis dan plastis material. Parameter yang dievaluasi meliputi *yield strength* dan *ultimate tensile strength*. Tiga spesimen diuji untuk setiap variasi *offset* untuk memastikan konsistensi dan reliabilitas data, dan nilai rata-rata digunakan untuk analisis.

### 2.5 Pengujian Mikrografi

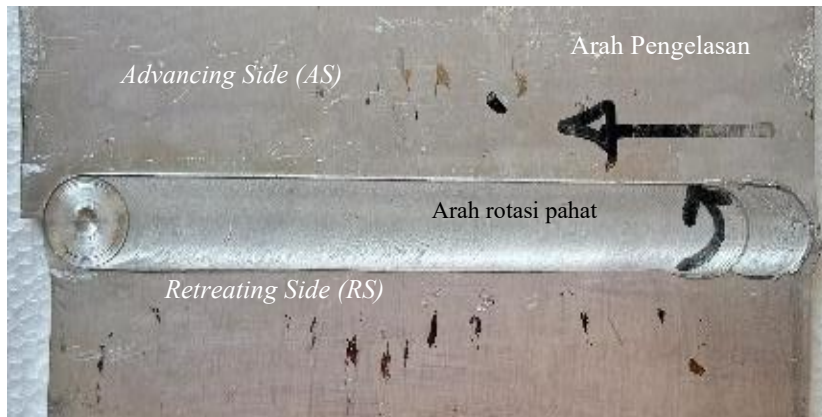
Spesimen metalografi dipersiapkan melalui proses *grinding* dan *polishing* tahap demi tahap untuk mendapatkan permukaan yang rata dan mengkilap. Proses *grinding* dilakukan menggunakan kertas abrasif dengan grit bertingkat: 240, 400, 600, 1000, dan 2000. Setelah *grinding*, spesimen dipoles menggunakan pasta autosol pada kain beludru hingga mencapai permukaan yang rata dan mengkilap tanpa goresan [13]. Setelah *polishing*, spesimen dietsa menggunakan larutan yang terdiri atas 6 mL HF dan 300 mL aquades, dengan waktu imersi selama 4 menit pada suhu ruang. Setelah

*etching*, spesimen segera dibilas dengan air mengalir, kemudian dikeringkan dengan tisu dan dibiarkan di udara terbuka minimal 24 jam sebelum pengamatan di bawah mikroskop. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik pada berbagai pembesaran (10x, 20x, 50x) untuk menganalisis zona-zona berbeda yaitu *base metal* (BM), *heat affected zone* (HAZ), *thermomechanically affected zone* (TMAZ), dan *stir zone* (SZ). Foto mikrografi diambil pada beberapa lokasi representatif untuk dokumentasi dan analisis lebih lanjut, dengan fokus pada karakteristik butir, distribusi presipitat, dan batas zona [14].

### 3 Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil Pengelasan

Hasil visual pengelasan menunjukkan gambar hasil pengelasan *one-step* DS-FSW variasi *offset* 2 mm yang ditunjukkan pada Gambar 2.

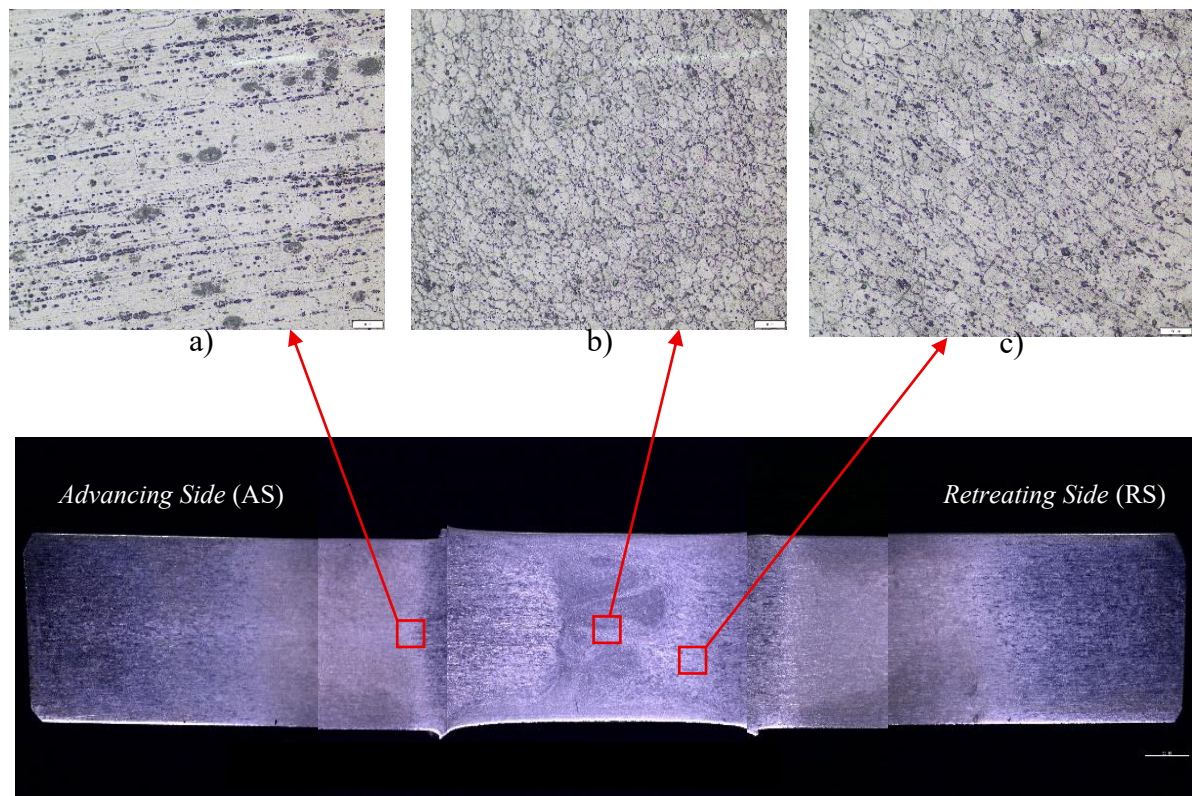


**Gambar 2.** Hasil pengelasan DS-FSW *offset* 2 mm

Hasil pengelasan menunjukkan bahwa pada *offset* 2 mm (Gambar 2), permukaan las halus, homogen, dan berkilau dengan pola aliran material stabil [15].

#### 3.2 Hasil Pengujian Mikrografi

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

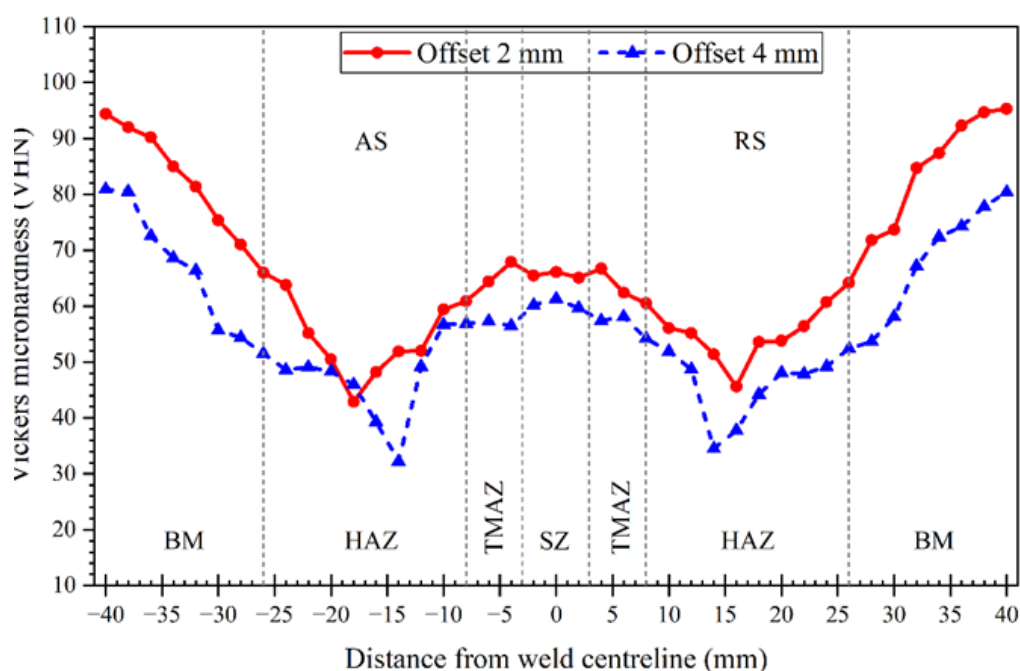


**Gambar 3.** Hasil pengujian mikrografi a) zona HAZ, b) zona SZ, c) zona TMAZ

Hasil pengamatan mikrografi pada Gambar 3 menunjukkan pola evolusi mikrostruktur yang khas di berbagai zona sambungan *double-side friction stir welding*, mengungkapkan bagaimana proses termal dan mekanis yang terjadi selama pengelasan menciptakan variasi struktural yang signifikan. Zona HAZ (Gambar 3a) menampilkan struktur yang masih terlihat terelongasi dengan orientasi butir mengikuti arah pengelasan, mencerminkan pengaruh termal tanpa deformasi plastis yang berarti, sehingga struktur butir masih menyerupai bentuk asli dari *base metal* meskipun mengalami pertumbuhan ringan akibat *heating cycle*. Sebaliknya, zona SZ (Gambar 3b) menampilkan struktur butir yang jauh lebih halus dan seragam berbentuk *equiaxed*, merupakan hasil dari *continuous dynamic recrystallization* yang terjadi akibat kombinasi *intensive plastic deformation* dan *elevated temperature* selama rotasi *tool* [16]. Fenomena ini konsisten dengan mekanisme *grain refinement* pada *friction stir welding*, di mana *severe plastic strain* dan *concurrent annealing effect* mendorong *nucleation* dan *growth* dari *fine recrystallized grains* yang menghilangkan jejak *original grain boundaries*. Zona TMAZ (Gambar 3c) menunjukkan karakteristik *intermediate* antara HAZ dan SZ, dengan butir yang mulai terdeformasi namun sebagian sudah mengalami rekristalisasi parsial, menciptakan struktur yang lebih kompleks dengan campuran orientasi butir acak. Pola evolusi mikrostruktur ini sangat penting karena homogenitas struktur di zona aduk secara langsung berkontribusi pada peningkatan kekerasan melalui *Hall-Petch strengthening mechanism*, sementara struktur terelongasi pada HAZ mengakibatkan pelunakan yang terlihat pada profil distribusi kekerasan, menjelaskan mengapa distribusi kekerasan pada *offset 2 mm* yang menghasilkan zona SZ lebih halus menunjukkan nilai kekerasan lebih tinggi dan konsisten dibanding *offset 4 mm* yang struktur zonanya lebih heterogen akibat ketidakseimbangan *thermal cycle* [17].

### 3.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers dan hasilnya diolah dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

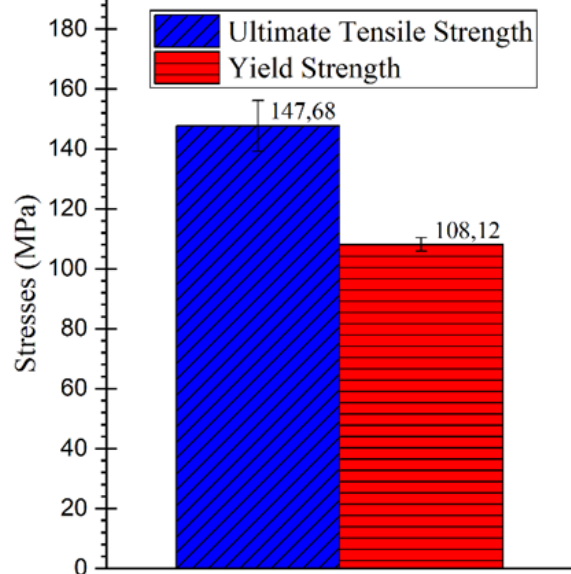


Gambar 4. Hasil pengujian kekerasan Vickers

Grafik distribusi kekerasan Vickers pada Gambar 4 menunjukkan pola yang sangat khas dari pengelasan *double-side friction stir welding*, di mana ketiga lintasan pengujian menunjukkan distribusi kekerasan yang hampir berimpit di seluruh penampang sambungan, mengindikasikan keseragaman kondisi termal dan mekanis yang sangat baik [18]. Penurunan kekerasan yang drastis di zona HAZ hingga mencapai titik terendah sekitar 40-50 VHN menunjukkan pelunakan presipitat (*HAZ softening*) akibat siklus termal pengelasan yang menyebabkan disolusi dan pertumbuhan kasar presipitat  $\beta''$  ( $Mg_2Si$ ), sedangkan peningkatan kekerasan kembali di zona aduk hingga 60-70 VHN menunjukkan bahwa rekristalisasi dinamis menghasilkan butir halus yang mampu mengkompensasi kehilangan penguatan presipitat melalui mekanisme *grain refinement strengthening*. Keseimbangan distribusi kekerasan antara sisi *advancing* dan *retreating* yang terlihat dalam grafik ini membuktikan bahwa proses DS-FSW berhasil menghasilkan aliran material yang seimbang, menjadikan zona HAZ sebagai daerah yang paling rentan karena merupakan titik dengan kekerasan terendah dan umumnya menjadi lokasi terjadinya kegagalan pada pembebanan mekanis. [19].

### 3.4 Hasil Pengujian Tarik

Hasil pengujian tarik dilakukan menggunakan mesin Gotech GT-7001-LC10 dan hasilnya diolah dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil pengujian tarik

Hasil pengujian tarik pada Gambar 5 menampilkan perbandingan antara kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*/UTS) dan kekuatan luluh (*yield strength*/YS) sambungan las, yang menunjukkan bahwa nilai UTS sebesar 147,68 MPa dengan kekuatan luluh mencapai 108,12 MPa. Kedua nilai ini menunjukkan bahwa sambungan hasil pengelasan *double-side friction stir welding* mampu mempertahankan sifat mekanik yang cukup baik, meskipun masih berada di bawah kekuatan material dasar AA6061-T6 yang seharusnya mencapai sekitar 310 MPa untuk UTS [20]. Penurunan kekuatan tarik ini merupakan fenomena umum pada sambungan FSW aluminium paduan yang mengalami perlakuan panas, terutama disebabkan oleh pelunakan zona HAZ akibat disolusi dan pertumbuhan kasar presipitat penguat  $\beta''$  ( $Mg_2Si$ ) selama siklus termal pengelasan. Meskipun demikian, perbandingan antara kekuatan luluh dan kekuatan tarik menunjukkan rasio yang cukup baik sekitar 73%, mengindikasikan bahwa material masih memiliki kemampuan deformasi plastis yang memadai sebelum mencapai titik patah, yang sangat penting untuk aplikasi struktural yang mengalami beban dinamis. Efisiensi sambungan yang diperoleh dari penelitian ini sekitar 47,6%, yang masih dalam rentang tipikal untuk pengelasan FSW pada aluminium seri 6000, di mana efisiensi sambungan umumnya berkisar antara 60-80% tergantung pada optimasi parameter pengelasan seperti kecepatan rotasi, *feed rate*, dan geometri *tool* [21].

### 4. Kesimpulan

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

1. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa distribusi kekerasan pada *offset* 2 mm homogen dan konsisten dengan nilai tertinggi di zona aduk sekitar 70 VHN. Penurunan kekerasan yang drastis di zona HAZ pada *offset* 2 mm menunjukkan pelunakan presipitat akibat siklus termal, namun *offset* 2 mm mampu meminimalkan pengaruh negatif ini melalui keseimbangan distribusi panas yang lebih baik, menghasilkan ketahanan mekanis yang superior di seluruh penampang sambungan.
2. Pengujian tarik mengungkapkan bahwa *offset* 2 mm menunjukkan keseimbangan mekanik yang baik dengan kekuatan luluh 108,12 MPa dan elongasi yang tinggi yaitu 8,2%, mengindikasikan material *offset* 2 mm memiliki kemampuan deformasi plastis dan penyerapan energi yang unggul untuk aplikasi dengan beban dinamis.
3. Hasil pengujian mikrografi menunjukkan bahwa *offset* 2 mm menghasilkan struktur butir yang sangat halus dan seragam di zona aduk (*equiaxed grains* hasil rekristalisasi dinamis penuh). Perbedaan struktur ini menunjukkan bahwa *offset* 2 mm mampu menciptakan keseimbangan distribusi panas dan deformasi plastis yang optimal, menghasilkan homogenitas mikrostruktur yang berkontribusi langsung pada peningkatan kekuatan tarik dan kekerasan.

### 5. Daftar Pustaka

- [1] Callister, W.D., & Rethwisch, D.G. (2020). *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING: An introduction*. WILEY.
- [2] Campbell, F. C. (Ed.). (2011). *Joining: Understanding the basics*. ASM International.

- [3] Chandana, R., & Saraswathamma, K. (2023). Impact of tool pin profiles in friction stir welding process-A review. *Materials Today: Proceedings*, 76, 602–606. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.097>
- [4] Fauzan Adzima A, & Abd Rahim. (2018). *ANALISIS SIFAT MEKANIS DAN MIKROSTRUKTUR PADA SAMBUNGAN PENGELASAN DISSIMILAR FRICTION STIR WELDING (FSW) ALUMINIUM AA 6061 DENGAN ALUMINIUM AA 5052* [POLITEKNIK NEGERI UJUNG PANDANG].
- [5] Feng, A. H., Chen, D. L., & Ma, Z. Y. (2010). Microstructure and Low-Cycle Fatigue of a Friction-Stir-Welded 6061 Aluminum Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 41(10), 2626–2641. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0279-2>
- [6] Ghiasvand, A., Yavari, M., Tomków, J., Grimaldo Guerrero, J., Kheradmandan, H., Dorofeev, A., Memon, S., & Derazkola, H. (2021). Investigation of Mechanical and Microstructural Properties of Welded Specimens of AA6061-T6 Alloy with Friction Stir Welding and Parallel-Friction Stir Welding Methods. *Materials*, 14(20), 6003. <https://doi.org/10.3390/ma14206003>
- [7] Hao, L., Jia, R., Zhai, X., Zhang, H., & Hou, J. (2020). Effect of Friction Stir Welding Parameters on Microstructure and Properties of Welded 5083 Aluminium Alloy. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 20(8), 5055–5063. <https://doi.org/10.1166/jnn.2020.18502>
- [8] Hejazi, I., & Mirsalehi, S. E. (2016). Effect of pin penetration depth on double-sided friction stir welded joints of AA6061-T913 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(3), 676–683. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64158-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64158-4)
- [9] Hellier, A. K., Chaphalkar, P. P., & Prusty, G. B. (2017). *Fracture Toughness Measurement for Aluminium 6061-T6 using Notched Round Bars*. [https://www.researchgate.net/publication/331887724\\_Fracture\\_Toughness\\_Measurement\\_for\\_Aluminium\\_6061-T6\\_using\\_Notched\\_Round\\_Bars](https://www.researchgate.net/publication/331887724_Fracture_Toughness_Measurement_for_Aluminium_6061-T6_using_Notched_Round_Bars)
- [10] Hendrato, Azka, M., Muslih, M. R., Apriansyah, R., Salman, N. J., Sulardjaka, Ilhamdi, Istiyanto, J., Verma, G., Kurniawan, A. D., Ansori, I., Shalahuddin, L., Valentino, J. M., Depari, Y. P. D. S., & Triyono. (2025). Fatigue crack growth and residual stress in simultaneous double-sided friction stir welded aluminum alloy AA6061-T6. *Journal of Advanced Joining Processes*, 11, 100300. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2025.100300>
- [11] Hendrato, Puspitasari, P., Jamasri, & Triyono. (2024a). Fatigue crack growth rate and mechanical properties of one-step double-side friction stir welded AA6061-T6. *Results in Engineering*, 21, 101958. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101958>
- [12] ASTM E384-17. (2017). Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0384-99>
- [13] Ilman, M. N. (2010). *COMPARATIVE STUDY ON FATIGUE CRACK GROWTH RATE BEHAVIOURS OF FRICTION-STIR WELDED ALUMINIUM ALLOYS 2024- T3 AND 6061-T6*.
- [14] Jacob, A., Mehmanparast, A., D'Urzo, R., & Kelleher, J. (2019). Experimental and numerical investigation of residual stress effects on fatigue crack growth behaviour of S355 steel weldments. *International Journal of Fatigue*, 128, 105196. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105196>
- [15] Khan, N., Rathee, S., & Srivastava, M. (2021). Friction stir welding: An overview on effect of tool variables. *Materials Today: Proceedings*, 47, 7196–7202. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.487>
- [16] ASTM International. (2015). Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0647-15E01>
- [17] Knippling, K. E., Dunand, D. C., & Seidman, D. N. (2006). Criteria for developing castable, creep-resistant aluminum-based alloys – A review. *Zeitschrift Für Metallkunde*, 97(3), 246–265. <https://doi.org/10.3139/146.101249>
- [18] Kondo, Y. (2003). Fatigue Under Variable Amplitude Loading. Dalam *Comprehensive Structural Integrity* (hlm. 253–279). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043749-4/04029-5>
- [19] Kossakowski, P. G., Wciślik, W., & Bakalarz, M. (2019). MACROSTRUCTURAL ANALYSIS OF FRICTION STIR WELDING (FSW) JOINTS. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 1(1). <https://doi.org/10.30564/jmer.v1i1.486>
- [20] Lathabai, S. (2011). Joining of aluminium and its alloys. Dalam *Fundamentals of Aluminium Metallurgy* (hlm. 607–654). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857090256.3.607>
- [21] Li, G., Zhou, L., Zhang, H., Luo, S., & Guo, N. (2021). Effects of traverse speed on weld formation, microstructure and mechanical properties of ZK60 Mg alloy joint by bobbin tool friction stir welding. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(12), 238–250. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.05.037>
- [22] Liu, H., Chen, Y., Yao, Z., & Luo, F. (2020). Effect of Tool Offset on the Microstructure and Properties of AA6061/AZ31B Friction Stir Welding Joints. *Metals*, 10(4), 546. <https://doi.org/10.3390/met10040546>