

ANALISIS PENGARUH *OFFSET* TERHADAP DISTRIBUSI KEKERASAN HASIL PENGELASAN *ONE STEP DOUBLE SIDE FRICTION STIR WELDING* PADA MATERIAL AA6061 – T6 DENGAN GEOMETRI PIN PERSEGI

*Michellin Pandhinata¹, 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: michelpandhi16@gmail.com

Abstrak

Pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) terus berkembang melalui berbagai inovasi untuk meningkatkan kualitas sambungan, salah satunya melalui metode *One Step Double Side Friction Stir Welding* (ODFSW). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *longitudinal offset* terhadap karakteristik distribusi kekerasan pada sambungan aluminium AA6061-T6 menggunakan geometri pin persegi. Variasi *offset* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 2 mm dan 4 mm. Pengujian difokuskan pada pengamatan makrografi untuk memastikan kualitas sambungan serta pengujian mikro-kekerasan *Vickers* untuk mengevaluasi sifat mekanis di berbagai zona las. Hasil pengamatan makrografi menunjukkan bahwa penggunaan pin persegi pada kedua variasi *offset* menghasilkan sambungan yang bebas dari cacat internal seperti *tunnel defect* atau porositas. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan profil yang khas pada sambungan FSW aluminium seri 6xxx, di mana terjadi penurunan kekerasan yang signifikan pada daerah *Heat-Affected Zone* (HAZ) dengan nilai terendah mencapai rentang 46 – 48 VHN akibat fenomena *precipitate coarsening*. Pada pusat adukan (*Stir Zone*), nilai kekerasan mengalami pemulihan hingga mencapai rentang 70 – 72 VHN. Spesimen dengan *offset* 4 mm tetap memiliki nilai kekerasan yang kompetitif di zona aduk meskipun menerima masukan panas yang lebih rendah, hal ini disebabkan oleh peningkatan laju regangan yang menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil. Secara keseluruhan, variasi *longitudinal offset* berpengaruh terhadap distribusi panas dan laju regangan yang secara langsung menentukan profil kekerasan akhir pada sambungan ODFSW AA6061-T6.

Kata kunci: aa6061-t6; kekerasan *vickers*; *offset*; *one step double side friction stir welding*; pin persegi

Abstract

Friction Stir Welding (FSW) continues to evolve through various innovations to improve joint quality, one of which is the *One Step Double Side Friction Stir Welding* (ODFSW) method. This study aims to analyze the effect of *longitudinal offset* variations on the hardness distribution characteristics of AA6061-T6 aluminum joints using a square pin geometry. The *offset* variations used in this research are 2 mm and 4 mm. The investigation focused on macrographic observation to ensure joint quality and *Vickers* micro-hardness testing to evaluate mechanical properties across various weld zones. Macrographic results indicated that the use of a square pin in both *offset* variations produced defect-free joints, with no internal flaws such as tunnel defects or porosity detected. Hardness testing results showed a typical profile for 6xxx series aluminum FSW joints, where a significant decrease in hardness occurred in the *Heat-Affected Zone* (HAZ), with the lowest values ranging from 46 to 48 VHN due to the *precipitate coarsening* phenomenon. In the *Stir Zone* (SZ), the hardness recovered to a range of 70 – 72 VHN. The 4 mm *offset* specimen maintained competitive hardness values in the stir zone despite lower heat input, which is attributed to the increased strain rate resulting in a more stable microstructure. Overall, the *longitudinal offset* variation significantly influences heat distribution and strain rate, which directly determines the final hardness profile of ODFSW AA6061-T6 joints.

Keywords : aa6061-t6; *offset*; *one step double side friction stir welding*; square pin; *vickers* hardness

1. Pendahuluan

Paduan aluminium AA6061-T6 semakin banyak digunakan dalam industri otomotif, dirgantara, dan kelautan karena rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta ketahanan korosi yang baik [1], [2]. Namun, pengelasan fusi konvensional pada material ini sering kali menimbulkan cacat seperti porositas dan retakan panas [3]. Sebagai solusi, metode *One Step Double Side Friction Stir Welding* (ODFSW) hadir untuk memberikan distribusi panas yang lebih merata dan aliran

material yang lebih optimal dibandingkan pengelasan satu sisi [4], [5]. Salah satu parameter kritis dalam ODFSW yang memengaruhi kualitas sambungan adalah posisi *offset* antara pahat atas dan bawah. *Offset* menentukan interaksi antar pahat dalam zona adukan, yang secara langsung memengaruhi homogenitas mikrostruktur dan profil mekanis material. Dalam konteks material *precipitate-hardened* seperti AA6061-T6, distribusi panas yang dihasilkan oleh variasi *offset* akan sangat menentukan perubahan nilai kekerasan di setiap zona lasan, mulai dari *Stir Zone* (SZ) hingga *Heat-Affected Zone* (HAZ). Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi *offset* terhadap distribusi kekerasan mikro pada sambungan ODFSW AA6061-T6 menggunakan pin persegi. Pemahaman mengenai profil kekerasan ini sangat penting untuk mengevaluasi integritas struktural sambungan dan menjadi dasar dalam perumusan parameter proses yang optimal untuk aplikasi industri yang menuntut keandalan tinggi.

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1 Material dan Pahat

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan aluminium seri 6xxx, yaitu AA6061-T6. Pemilihan material ini didasarkan pada aplikasinya yang luas di sektor struktural yang membutuhkan rasio kekuatan dan berat yang optimal. Material tersebut disediakan dalam bentuk pelat dengan ketebalan 8 mm. Sebelum proses pengelasan dilakukan, pelat dipotong menggunakan mesin potong presisi menjadi dimensi 250 mm × 125 mm untuk setiap pasang sambungan *butt joint*. Permukaan pelat dibersihkan menggunakan pelarut kimia atau sikat kawat halus untuk menghilangkan lapisan oksida dan kotoran yang dapat memicu terbentuknya cacat pada hasil lasan. Karakteristik fisik dari material AA6061-T6 yang digunakan dalam studi ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Plat AA6061-T6

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

Proses penyambungan material AA6061-T6 dilakukan menggunakan mesin *One Step Double Side Friction Stir Welding* (ODFSW) merk Yeong Chin yang memiliki kapasitas beban aksial maksimal hingga 100 kN. Kapasitas mesin yang besar ini sangat krusial untuk memastikan kestabilan gaya tekan (*forge force*) selama pin melakukan penetrasi dan pengadukan pada material aluminium setebal 8 mm yang memiliki hambatan deformasi cukup tinggi. Sebelum proses pengelasan dimulai, kedua pelat AA6061-T6 dipasang pada meja kerja menggunakan sistem pengekaman (*clamping system*) yang dirancang khusus. Sistem pengekaman ini dibuat sangat presisi dan kaku guna meminimalisir getaran serta menjaga stabilitas posisi benda kerja dari potensi pergeseran akibat gaya lateral yang besar saat pahat berotasi. Variabel utama dalam penelitian ini, yaitu longitudinal *offset*, diatur secara manual pada sistem koordinat mesin dengan variasi jarak sebesar 2 mm dan 4 mm. Pengaturan ini menentukan titik temu aliran material dari pahat atas dan bawah. Sementara itu, parameter operasional lainnya dijaga konstan untuk mengisolasi pengaruh *offset*, di antaranya adalah kecepatan *traverse* atau kecepatan pengelasan yang ditetapkan sebesar 100 mm/menit. Kombinasi antara kecepatan rotasi 1500 rpm dan kecepatan *traverse* ini menentukan besarnya masukan panas (*heat input*) per satuan panjang sambungan. Untuk memvalidasi konsistensi panas yang dihasilkan selama proses berlangsung, dilakukan pemantauan suhu permukaan secara kontinu menggunakan termometer inframerah (*thermogun*) dengan tingkat akurasi tinggi. Pengukuran suhu dilakukan pada beberapa titik di sekitar area *Stir Zone* (SZ) segera setelah pahat melintas. Data suhu ini sangat penting sebagai data pendukung dalam menganalisis fenomena perubahan kekerasan pada zona *Heat-Affected Zone* (HAZ), mengingat material AA6061-T6 sangat sensitif terhadap siklus termal yang dapat menyebabkan pelunakan (*softening*) akibat pengkasan butir endapan.

2.3 Pengujian Mikrografi

Persiapan spesimen metalografi dilakukan melalui serangkaian proses *grinding* dan *polishing* secara bertahap guna memperoleh permukaan material yang planar dan reflektif [6]. Tahap *grinding* menggunakan kertas abrasif silikon karbida dengan tingkat kekasaran (*grit*) yang meningkat secara progresif, mulai dari 240, 400, 600, 1000, hingga 2000. Selanjutnya, spesimen dipoles halus menggunakan media kain beludru yang dibantu dengan pasta autosol hingga mencapai kualitas permukaan *mirror finish* yang bebas dari goresan mikroskopis. Untuk memunculkan detail struktur mikro, dilakukan proses pengetsan menggunakan larutan etsa (campuran 6 mL HF dan 300 mL akuades) melalui metode imersi selama 4 menit pada temperatur ruang. Pasca pengetsan, spesimen segera dibersihkan dengan air mengalir, dikeringkan, dan dидiamkan dalam kondisi terbuka selama minimal 24 jam untuk menstabilkan kondisi permukaan sebelum observasi mikroskopis. Pengamatan metalografi dilakukan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 10x, 20x, dan 50x guna mengidentifikasi secara detail zona-zona hasil lasan yang meliputi *Base Metal* (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), serta *Stir Zone* (SZ). Fokus utama dari dokumentasi mikrografi ini adalah analisis karakteristik batas butir, sebaran presipitat, serta morfologi transisi antar zona pengelasan [7].

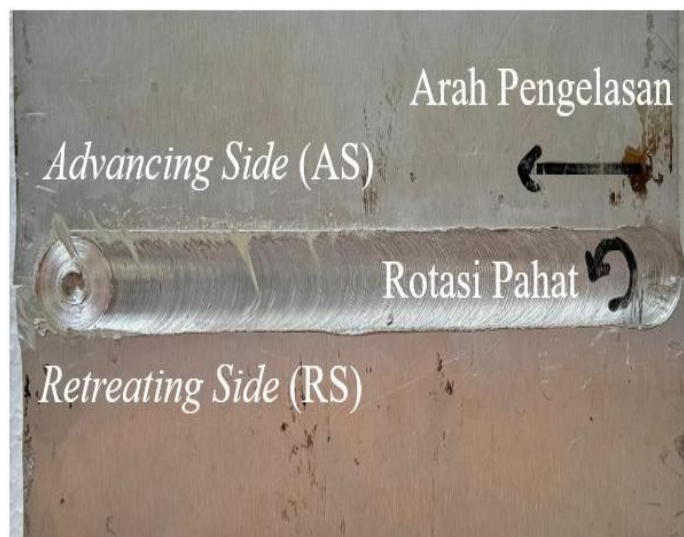
2.4 Pengujian Kekerasan

Karakterisasi nilai kekerasan mikro pada spesimen dilakukan dengan metode Vickers menggunakan instrumen Shimadzu HMV-2000 yang memiliki tingkat presisi indentasi sebesar $\pm 0,01$ mm, merujuk pada regulasi standar ASTM E384 [8]. Prosedur pengujian diimplementasikan melalui pemetaan titik-titik indentasi secara transversal melintasi garis sambungan las dengan interval antar titik sejauh 1 mm. Parameter pembebanan yang ditetapkan adalah 300 gf dengan durasi penekanan (*dwell time*) selama 12 detik. Pengukuran dilakukan secara komprehensif pada tiga lintasan horizontal yang berbeda, mencakup area atas, tengah, dan bawah dari penampang sambungan. Untuk menjamin validitas dan akurasi data yang diperoleh, dilakukan pengulangan minimal sebanyak lima kali pada setiap titik uji. Nilai kekerasan Vickers (VHN) dikalkulasi berdasarkan rumusan standar $HV = 1.8544 \times F/d^2$, di mana F merepresentasikan beban (kgf) dan d merupakan nilai rata-rata panjang diagonal jejak indentasi (mm). Seluruh data hasil pengujian kemudian dipresentasikan dalam bentuk grafik distribusi kekerasan terhadap posisi guna memberikan gambaran visual mengenai variasi kekerasan di seluruh zona pengelasan.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengelasan

Berdasarkan hasil observasi visual, kondisi permukaan sambungan ODFSW dengan variasi offset 4 mm ditampilkan pada Gambar 2.

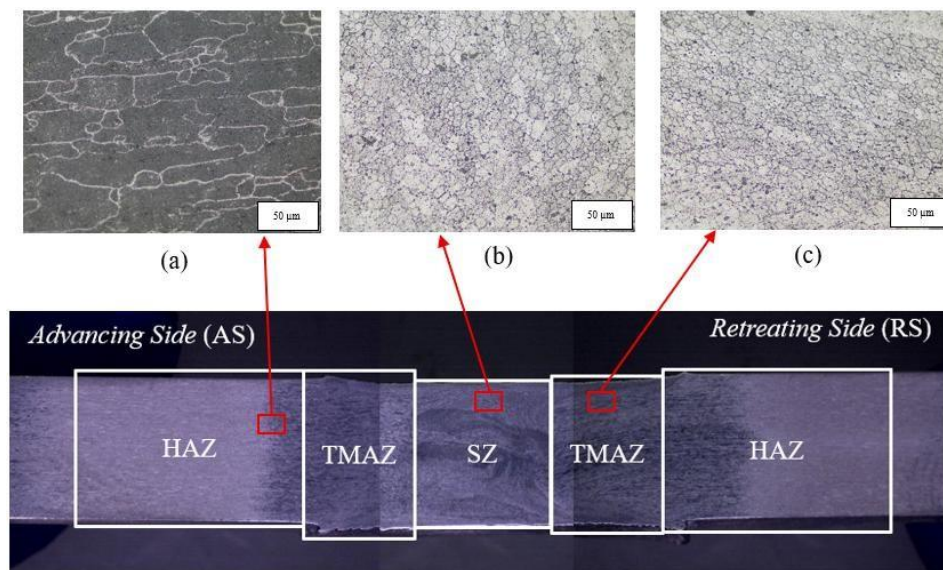


Gambar 2. Hasil pengelasan ODFSW offset 4 mm

Hasil dokumentasi visual menunjukkan permukaan las yang rapat dan seragam pada seluruh spesimen, yang mengindikasikan bahwa penggunaan pin persegi memberikan efek pengadukan mekanis yang lebih agresif. Mekanisme *pulsating action* dari sudut-sudut pin persegi menciptakan rasio *swept volume* yang tinggi, sehingga material plastis terdistribusi secara dinamis membentuk struktur riak (*ripples*) yang tegas (Elangovan & Balasubramanian, 2008). Secara komparatif, spesimen dengan offset 2 mm menghasilkan pola riak yang lebih simetris dan rapi karena distribusi panas yang lebih merata di sekitar garis sambungan. Sebaliknya, pada offset 4 mm, struktur riak cenderung lebih kasar dan kurang simetris. Hal ini sejalan dengan temuan Ghiasvand et al. (2020) bahwa peningkatan nilai offset mengakibatkan penurunan masukan panas (*heat input*) karena posisi pahat yang menjauhi dari garis tengah, sehingga proses pengadukan material menjadi lebih berat dan menghasilkan jejak riak yang lebih kontras.

3.2 Hasil Pengujian Mikrografi

Karakterisasi struktur mikro dilakukan melalui pengamatan mikrografi menggunakan mikroskop yang ditampilkan pada Gambar 3.

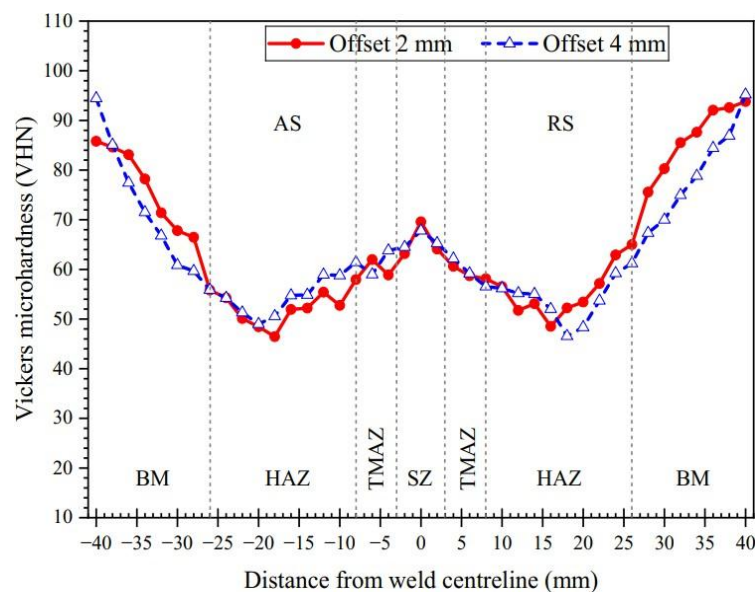


Gambar 3. Hasil pengujian mikrografi a) zona HAZ, b) zona SZ, c) zona TMAZ.

Pengamatan struktur mikro pada sambungan ODFSW dengan variasi *offset* 2 mm dan 4 mm menunjukkan perubahan morfologi butir yang signifikan pada ketiga zona utama, yaitu HAZ, TMAZ, dan SZ. Pada zona HAZ, butir kasar asli AA6061 tetap bertahan tanpa rekristalisasi karena hanya terpapar siklus termal [9], dengan kecenderungan batas butir yang lebih kontras pada sisi *Advancing Side* (AS) untuk spesimen *offset* 4 mm. Transisi menuju zona TMAZ memperlihatkan distorsi geometri butir yang melengkung mengikuti aliran material akibat pengaruh panas dan gaya geser mekanis tanpa terjadinya rekristalisasi penuh, selaras dengan teori [10] mengenai karakteristik aluminium pada kondisi regangan plastik tinggi. Puncak transformasi terjadi di pusat sambungan (*Stir Zone*), di mana butir kasar bertransformasi total menjadi kristal *equiaxed* yang halus melalui mekanisme rekristalisasi dinamis. Efek pulsasi agresif dari penggunaan pin persegi terbukti efektif dalam memfasilitasi *shearing action* yang lebih kuat untuk penghalusan butir yang optimal [11]. Variasi *offset* 2 mm menghasilkan mikrostruktur SZ yang paling homogen dan rapat, sedangkan *offset* 4 mm menunjukkan gradien transisi yang lebih kontras akibat fenomena *colder welds* yang meningkatkan laju regangan selama proses deformasi berlangsung.

3.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan dengan metode Vickers, kemudian data yang diperoleh diolah dan disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil pengujian kekerasan Vickers.

Hasil pengujian mikro-kekerasan melintang pada sambungan ODFSW AA6061-T6 dengan variasi *longitudinal offset* 2 mm dan 4 mm disajikan dalam profil distribusi yang secara umum membentuk pola simetris menyerupai huruf "W". Pola ini merupakan karakteristik khas pada sambungan *Friction Stir Welding* material aluminium paduan seri 6xxx yang diperkuat dengan mekanisme *precipitation hardening*. Berdasarkan data pengujian, ditemukan bahwa profil kekerasan sangat dipengaruhi oleh distribusi panas yang dihasilkan selama proses pengadukan. Pada area *Heat-Affected Zone* (HAZ), kedua variasi *offset* menunjukkan penurunan kekerasan yang sangat drastis dibandingkan dengan logam induk (*Base Metal*). Nilai kekerasan pada zona ini merosot hingga mencapai rentang 46 – 48 VHN. Fenomena pelunakan (*softening*) yang signifikan ini merupakan akibat langsung dari siklus termal yang diterima material. Suhu yang mencapai titik kritis pada HAZ memicu terjadinya fenomena *precipitate coarsening* (pengkasaran presipitat) atau pelarutan kembali fase penguat utama (β''). Akibat pengkasaran butir endapan ini, jarak antar partikel penguat menjadi lebih lebar, sehingga kehilangan efektivitasnya dalam merintang pergerakan dislokasi saat menerima beban tekan dari indenter Vickers. Hal ini menjelaskan mengapa HAZ menjadi titik paling lemah secara struktural pada sambungan las FSW seri 6xxx.

Sebaliknya, saat memasuki pusat adukan atau *Stir Zone* (SZ), nilai kekerasan kembali mengalami pemulihan (*recovery*) dan meningkat hingga mencapai rentang 70 – 72 VHN. Meskipun zona ini menerima masukan panas yang paling tinggi, kenaikan kekerasan terjadi karena adanya mekanisme rekristalisasi dinamis (*dynamic recrystallization*). Proses pengadukan agresif oleh pin persegi menyebabkan butiran logam mengalami deformasi plastis yang sangat berat, menghasilkan struktur butir yang jauh lebih halus (ekuiaksial) dibandingkan struktur mikro awal. Meskipun fase penguat asli mungkin telah larut akibat panas, struktur butir yang sangat halus ini memberikan kontribusi pada penguatan batas butir (*grain boundary strengthening*), sehingga nilai kekerasan di pusat lasan tetap lebih tinggi dibandingkan dengan zona HAZ di sekitarnya. Variasi *longitudinal offset* sebesar 2 mm dan 4 mm memberikan sedikit perbedaan pada lebar profil kekerasan. Pada *offset* 4 mm, distribusi panas cenderung lebih tersebar, yang mempengaruhi gradien kekerasan di antara zona transisi TMAZ dan SZ. Pemantauan suhu selama proses menggunakan *thermogun* mengonfirmasi bahwa manajemen panas yang lebih baik pada variasi *offset* tertentu dapat meminimalisir perluasan zona lunak pada HAZ, yang pada akhirnya menentukan integritas mekanis sambungan secara keseluruhan.

4. Kesimpulan

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

1. Penggunaan geometri pin persegi pada kedua variasi *longitudinal offset* (2 mm dan 4 mm) terbukti mampu menghasilkan sambungan yang berkualitas baik. Hasil pengamatan makrografi menunjukkan tidak adanya cacat internal seperti *tunnel defect*, *void*, maupun porositas, yang mengindikasikan bahwa aliran material dan mekanisme pengadukan telah berlangsung secara optimal.
2. Distribusi kekerasan mikro pada seluruh spesimen menunjukkan pola karakteristik. Penurunan kekerasan paling signifikan terjadi pada zona *Heat-Affected Zone* (HAZ) dengan nilai terendah berada pada rentang 46 – 48 VHN. Hal ini disebabkan oleh siklus termal pengelasan yang memicu fenomena *precipitate coarsening* (pengkasaran endapan) pada paduan aluminium seri 6xxx.
3. Terjadi pemulihan (*recovery*) nilai kekerasan pada pusat adukan (*Stir Zone*) hingga mencapai rentang 70 – 72 VHN. Kenaikan ini didorong oleh mekanisme rekristalisasi dinamis yang menghasilkan struktur butir ekuiaksial yang lebih halus akibat deformasi plastis yang agresif dari pin persegi, sehingga memberikan penguatan batas butir (*grain boundary strengthening*).
4. Variasi *longitudinal offset* memengaruhi luas dan gradien distribusi kekerasan. Spesimen dengan *offset* 4 mm cenderung menghasilkan stabilitas nilai kekerasan yang lebih baik di area pusat adukan meskipun menerima masukan panas yang relatif lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan jarak antar pahat (*offset*) merupakan parameter kunci dalam mengontrol siklus termal dan profil kekuatan mekanis akhir pada sambungan ODFSW.

5. Daftar Pustaka

- [1] Y. C. Gao *et al.*, "Research progress, application and development of high performance 6000 series aluminum alloys for new energy vehicles," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 32, pp. 1868–1900, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.08.018.
- [2] D. Wang, Z. Zhou, Z. Liu, and C. Xue, "A review of some new materials for lightweight and better performance purposes in vehicle components," *Theoretical and Natural Science*, vol. 28, no. 1, pp. 85–96, Dec. 2023, doi: 10.54254/2753-8818/28/20230474.
- [3] R. P. Verma, K. N. Pandey, K. András, R. Khargotra, and T. Singh, "Difficulties and redressal in joining of aluminium alloys by GMA and GTA welding: a review," Mar. 01, 2023, *Elsevier Editora Ltda*. doi: 10.1016/j.jmrt.2023.01.183.
- [4] 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.
- [5] 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.

-
- [6] M. Arizal Prasetyo Widodo, “Study of Friction Stir Welding Process Parameters for Welding AA6061-T651 Material with Corner Joints 90° on Macro Structures [Studi Parameter Proses Friction Stir Welding pada Pengelasan Material AA6061-T651 dengan Sambungan Sudut 90° Terhadap Struktur Makro],” 2024.
 - [7] A. S. Baskoro, G. Kiswanto, A. Widyianto, and M. Panji, “Influence Of Welding Parameters On Macrostructure, Microstructure And Mechanical Properties In Orbital Pipe Welding Of A36 Mild Steel Pipe,” *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 288–296, 2021, doi: 10.30880/ijie.2021.13.07.033.
 - [8] ASTM E384, “Test Method for Microindentation Hardness of Materials,” Jun. 01, 2017, *ASTM International, West Conshohocken, PA*. doi: 10.1520/E0384-17.
 - [9] P. L. Threadgill, A. J. Leonard, H. R. Shercliff, and P. J. Withers, “Friction stir welding of aluminium alloys,” 2009, *Maney Publishing*. doi: 10.1179/174328009X411136.
 - [10] Rajiv S. Mishra, “Rajiv S. Mishra-Friction Stir Welding and Processing (2007),” 2007, doi: 10.1361/fswp2007p001.
 - [11] K. Elangovan and V. Balasubramanian, “Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 459, no. 1–2, pp. 7–18, Jun. 2007, doi: 10.1016/j.msea.2006.12.124.