

PENGARUH KECEPATAN PUTAR TOOL TERHADAP DISTRIBUSI KEKERASAN SAMBUNGAN DISSIMILAR AA5052 DAN AA6061 HASIL FRICTION STIR WELDING

*Aditya Rahmanu Trisna¹, Gunawan Dwi Haryadi², Yusuf Umardani²

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: adityarahmanutrisna@students.undip.ac.id

Abstrak

Friction Stir Welding (FSW) merupakan metode pengelasan solid-state yang banyak digunakan untuk penyambungan material aluminium karena mampu menghasilkan sambungan berkualitas tinggi dengan cacat yang minimal. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kecepatan putar tool terhadap distribusi kekerasan pada sambungan *dissimilar* aluminium alloy AA5052 dan AA6061. Kedua material dipilih karena memiliki karakteristik yang saling melengkapi, yaitu ketahanan korosi yang baik pada AA5052 dan kekuatan mekanik tinggi pada AA6061. Proses pengelasan dilakukan menggunakan metode butt joint dengan variasi kecepatan putar sebesar 1100 rpm dan 1800 rpm. Parameter lain seperti kecepatan pengelasan, sudut kemiringan tool, dan kedalaman penetrasi dibuat konstan untuk memastikan bahwa perubahan sifat mekanik hanya dipengaruhi oleh kecepatan putar tool. Evaluasi kualitas sambungan dilakukan melalui pengujian kekerasan Vickers pada daerah Base Metal (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *Weld Nugget Zone* (WNZ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar tool menghasilkan peningkatan heat input selama proses pengelasan yang menyebabkan terjadinya rekristalisasi dinamis pada zona nugget. Struktur butir yang lebih halus menghasilkan distribusi kekerasan yang lebih homogen dibandingkan kondisi kecepatan putar rendah. Namun demikian, peningkatan heat input juga menyebabkan pelunakan pada daerah HAZ akibat pelarutan presipitat penguat pada AA6061. Distribusi kekerasan tertinggi ditemukan pada zona nugget dengan kondisi kecepatan putar optimum, sedangkan nilai kekerasan terendah ditemukan pada daerah HAZ. Penelitian ini menunjukkan bahwa kecepatan putar tool merupakan parameter penting yang memengaruhi kualitas metalurgi dan sifat mekanik sambungan FSW *dissimilar* aluminium. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai referensi dalam optimasi parameter pengelasan untuk aplikasi industri transportasi, maritim, dan konstruksi ringan.

Kata kunci: aa5052; aa6061; *friction stir welding*; kekerasan vickers; *rotational speed*

Abstract

Friction Stir Welding (FSW) is a solid-state joining process widely applied to aluminum alloys due to its ability to produce high-quality joints with minimal defects. This study investigates the effect of tool rotational speed on the hardness distribution of dissimilar AA5052 and AA6061 aluminum alloy joints. These alloys were selected because AA5052 provides excellent corrosion resistance while AA6061 offers superior mechanical strength. The Welding process was conducted using a butt-joint configuration with rotational speeds of 1100 rpm and 1800 rpm. Other Welding parameters, including Welding speed, tool tilt angle, and plunge depth, were maintained constant to isolate the influence of rotational speed. Joint quality was evaluated through Vickers microhardness testing across the Base Metal (BM), Heat Affected Zone (HAZ), Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ), and Weld Nugget Zone (WNZ). The results indicate that increasing rotational speed enhances heat input and promotes dynamic recrystallization within the nugget zone. Grain refinement contributed to a more homogeneous hardness distribution compared with lower rotational speed conditions. However, excessive heat input also induced softening in the HAZ due to precipitate dissolution in AA6061. The highest hardness values were observed in the Nugget Zone under the optimum rotational speed condition, whereas the lowest hardness values were consistently located in the HAZ region. These findings demonstrate that tool rotational speed is a critical parameter affecting metallurgical characteristics and mechanical performance of dissimilar aluminum FSW joints. The results provide useful guidance for parameter optimization in transportation, marine, and lightweight structural applications.

Keywords: aa5052; aa6061; *friction stir welding*; hardness distribution; *rotational speed*

1. Pendahuluan

Industri manufaktur modern menuntut teknologi penyambungan yang mampu menghasilkan sambungan berkualitas tinggi, efisiensi energi yang baik, serta mampu memenuhi tuntutan performa material pada berbagai sektor industri. Aluminium menjadi salah satu material yang paling banyak digunakan dalam bidang otomotif, maritim, konstruksi, dan kedirgantaraan karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, serta kemudahan dalam proses fabrikasi dan pembentukan [8]. Meskipun demikian, proses penyambungan aluminium menggunakan metode pengelasan fusi konvensional sering menghadapi berbagai kendala seperti distorsi termal, porositas, retak panas, dan pembentukan lapisan oksida yang dapat menurunkan kualitas sambungan. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkan teknologi *Friction Stir Welding* (FSW) yang merupakan metode pengelasan solid-state di mana penyambungan terjadi tanpa proses pencairan logam sehingga mampu menghasilkan kualitas sambungan yang lebih baik dengan cacat yang lebih rendah dibandingkan metode pengelasan konvensional [1].

Prinsip kerja FSW memanfaatkan tool yang terdiri atas shoulder dan pin yang berputar untuk menghasilkan panas akibat gesekan dan deformasi plastis material. Aliran material selama proses pengelasan sangat dipengaruhi oleh desain tool sehingga pemilihan geometri tool menjadi faktor penting dalam menghasilkan sambungan yang berkualitas [2]. Selain itu, karakteristik keausan tool juga berpengaruh terhadap stabilitas proses pengelasan dan kualitas hasil sambungan, terutama pada proses pengelasan dengan temperatur tinggi dan waktu operasi yang panjang [4]. Oleh karena itu, pemahaman mengenai interaksi antara desain tool, parameter proses, dan perilaku material menjadi aspek penting dalam optimasi proses FSW.

Salah satu aplikasi FSW yang banyak dikembangkan adalah penyambungan aluminium paduan berbeda (*dissimilar Welding*). Kombinasi aluminium AA5052 dan AA6061 menarik untuk diteliti karena kedua material tersebut memiliki karakteristik yang saling melengkapi. AA5052 dikenal memiliki ketahanan korosi yang sangat baik dan kemampuan formabilitas tinggi, sedangkan AA6061 memiliki kekuatan mekanik yang lebih tinggi sehingga banyak digunakan pada struktur yang membutuhkan kekuatan dan kekakuan yang baik [7]. Penyambungan kedua material ini berpotensi menghasilkan komponen yang ringan namun tetap memiliki performa mekanik yang memadai untuk berbagai aplikasi industri.

Keberhasilan proses FSW dipengaruhi oleh berbagai parameter pengelasan seperti *rotational speed*, *Welding speed*, *plunge depth*, *tool tilt angle*, dan geometri tool [3]. Di antara parameter tersebut, *rotational speed* memiliki peran yang sangat penting karena menentukan besarnya heat input yang dihasilkan selama proses pengelasan. Peningkatan *rotational speed* akan meningkatkan temperatur proses sehingga memengaruhi aliran material, ukuran butir, rekristalisasi dinamis, serta distribusi sifat mekanik pada daerah sambungan [1,3]. Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa perubahan kondisi termal selama proses FSW dapat memengaruhi evolusi mikrostruktur dan pembentukan zona-zona pengelasan seperti *Heat Affected Zone* (HAZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *Weld Nugget Zone* (WNZ) yang secara langsung menentukan performa mekanik sambungan [6].

Selain parameter proses, karakterisasi sifat mekanik menjadi aspek penting dalam evaluasi kualitas sambungan hasil FSW. Pengujian kekerasan mikro Vickers banyak digunakan untuk mengevaluasi distribusi kekerasan pada berbagai zona sambungan karena mampu memberikan informasi mengenai perubahan mikrostruktur akibat siklus termal dan deformasi plastis selama pengelasan [9]. Sementara itu, pengujian tarik merupakan metode standar untuk menentukan kekuatan sambungan dan perilaku deformasi material setelah proses pengelasan [10]. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa kondisi pendinginan dan distribusi panas selama proses FSW dapat memengaruhi perkembangan mikrostruktur dan sifat mekanik hasil pengelasan, termasuk pada proses *Friction Stir processing* dan *submerged Friction Stir processing* [5].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh kecepatan putar tool (*rotational speed*) terhadap distribusi kekerasan sambungan *dissimilar* aluminium AA5052 dan AA6061 hasil *Friction Stir Welding*. Evaluasi dilakukan melalui pengujian kekerasan Vickers pada berbagai zona sambungan untuk memahami hubungan antara heat input, perubahan mikrostruktur, dan distribusi kekerasan yang dihasilkan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai parameter pengelasan yang optimal serta menjadi referensi dalam pengembangan teknologi penyambungan aluminium untuk aplikasi industri modern [1–10].

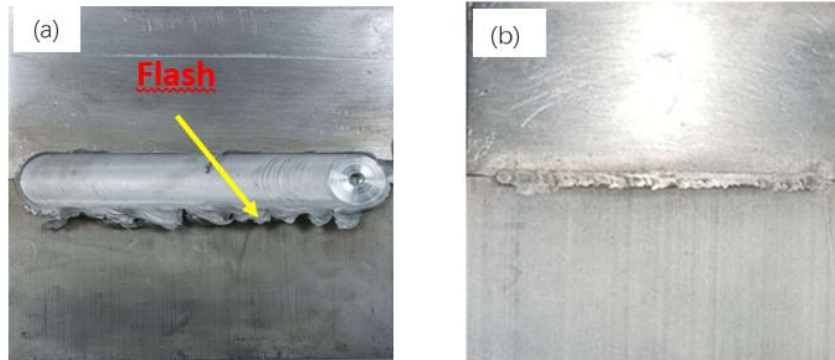
2. Bahan dan Metode Penelitian

Material yang digunakan adalah aluminium alloy AA5052 dan AA6061 dengan ketebalan 5 mm. Proses penyambungan dilakukan menggunakan metode *Friction Stir Welding* pada konfigurasi butt joint. Tool yang digunakan terbuat dari baja H13 dengan desain taper threaded pin. Variasi parameter penelitian berupa *rotational speed* 1100 rpm dan 1800 rpm, sedangkan *Welding speed* dipertahankan konstan pada 30 mm/min.

Karakterisasi dilakukan menggunakan pengujian kekerasan mikro Vickers pada beberapa zona sambungan meliputi Base Metal (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *Weld Nugget Zone* (WNZ). Analisis dilakukan dengan membandingkan distribusi kekerasan pada masing-masing zona terhadap perubahan kecepatan putar tool sehingga dapat diketahui pengaruh heat input terhadap sifat mekanik sambungan.

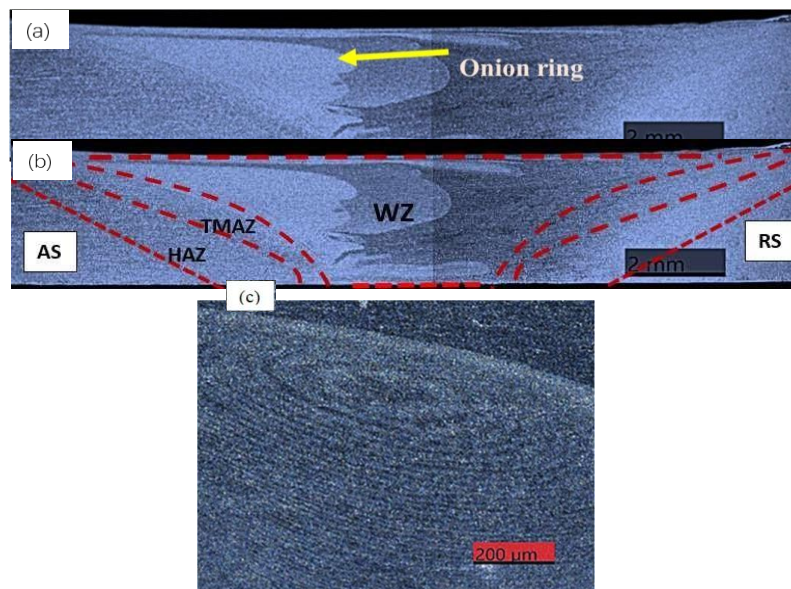
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) pada sambungan *dissimilar* AA5052 dan AA6061 dengan kecepatan putar tool 1460 rpm menunjukkan kualitas permukaan yang baik, ditandai dengan permukaan las yang rata dan homogen tanpa adanya cacat berupa retak, porositas, maupun *lack of penetration*. Meskipun demikian, pada sisi *retreating side* (RS) ditemukan terbentuknya *flash* akibat keluarnya material plastis selama proses pengelasan. Fenomena ini mengindikasikan bahwa panas yang dihasilkan selama proses FSW cukup tinggi sehingga mampu melunakkan material di sekitar tool. Secara umum, kondisi tersebut menunjukkan bahwa parameter kecepatan putar yang digunakan mampu menghasilkan sambungan yang baik dengan kontinuitas material yang optimal. Hasil dapat dilihat pada Gambar 1.



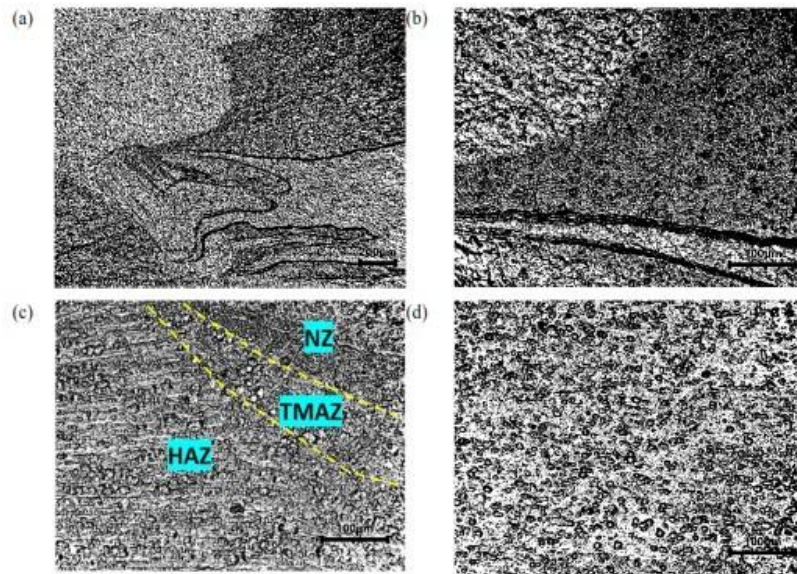
Gambar 1. Permukaan sambungan FSW bagian atas dan bawah pada kecepatan putar tool 1460 rpm

Pengamatan struktur makro pada penampang sambungan memperlihatkan bahwa seluruh ketebalan material berhasil tersambung secara sempurna tanpa adanya cacat internal. Tiga zona karakteristik hasil FSW, yaitu *Nugget Zone* (NZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *Heat Affected Zone* (HAZ), dapat diidentifikasi dengan jelas. Selain itu, terlihat pola *onion ring* pada daerah nugget yang merupakan ciri khas proses FSW akibat pencampuran material dari AA5052 dan AA6061 selama proses pengadukan. Keberadaan pola tersebut menunjukkan bahwa kecepatan putar tool menghasilkan aliran material yang baik sehingga proses pencampuran berlangsung secara homogen dan menghasilkan ikatan metalurgi yang kuat seperti pada Gambar 2.



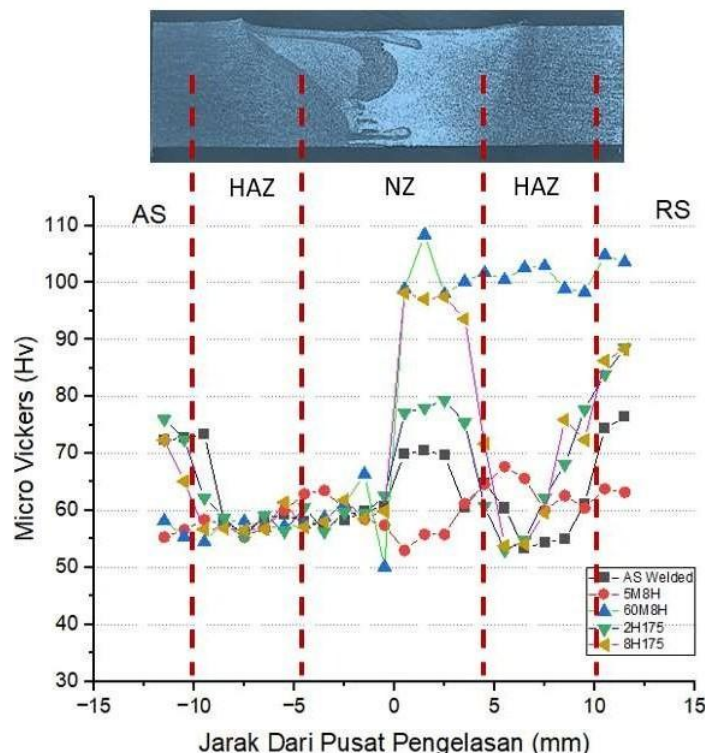
Gambar 2. Foto makro penampang sambungan yang menunjukkan zona NZ, TMAZ, HAZ

Struktur mikro pada daerah nugget menunjukkan butiran yang lebih halus dibandingkan logam dasar akibat terjadinya rekristalisasi dinamis selama proses pengelasan. Kombinasi panas gesekan dan deformasi plastis yang tinggi menyebabkan terbentuknya butiran *equiaxed* berukuran kecil sehingga meningkatkan homogenitas struktur mikro pada zona tersebut. Sementara itu, pada daerah TMAZ terlihat butiran yang mengalami deformasi akibat pengaruh mekanik dan termal, sedangkan pada HAZ perubahan struktur mikro hanya dipengaruhi oleh siklus termal tanpa mengalami deformasi plastis yang signifikan sehingga ukuran butir relatif lebih besar dibandingkan daerah nugget yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur mikro *Nugget Zone* (50× dan 200×)

Perbedaan karakteristik struktur mikro pada setiap zona memberikan pengaruh langsung terhadap distribusi nilai kekerasan sambungan. Nilai kekerasan logam dasar AA5052 sebesar 68,2 HV dan AA6061 sebesar 102,4 HV mengalami perubahan setelah proses FSW. Pada daerah nugget diperoleh nilai kekerasan maksimum sekitar 70,5 HV, sedangkan nilai kekerasan terendah ditemukan pada HAZ sisi AA6061 sebesar 49,6 HV. Distribusi ini menunjukkan bahwa proses FSW menghasilkan variasi sifat mekanik yang dipengaruhi oleh perubahan mikrostruktur dan siklus termal selama pengelasan seperti grafik di Gambar 4.



Gambar 4. Grafik distribusi kekerasan mikro sepanjang penampang sambungan FSW AA5052–AA6061

Peningkatan kekerasan pada daerah nugget disebabkan oleh terbentuknya butiran yang lebih halus akibat mekanisme rekristalisasi dinamis. Berdasarkan hubungan Hall–Petch, semakin kecil ukuran butir maka hambatan terhadap pergerakan dislokasi semakin besar sehingga nilai kekerasan meningkat. Selain itu, proses pengadukan material oleh tool menghasilkan distribusi struktur yang lebih homogen sehingga daerah nugget memiliki karakteristik mekanik yang lebih baik dibandingkan daerah di sekitarnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa kecepatan putar tool yang digunakan mampu menghasilkan deformasi plastis yang optimal untuk memperbaiki struktur mikro sambungan. Sebaliknya,

penurunan kekerasan pada daerah HAZ terutama di sisi AA6061 dipengaruhi oleh tingginya masukan panas selama proses FSW. AA6061 merupakan paduan aluminium yang dapat diperkuat melalui perlakuan panas (*heat-treatable alloy*), sehingga siklus termal selama pengelasan menyebabkan pelarutan kembali presipitat penguas (*precipitate dissolution*) serta pertumbuhan ukuran butir. Akibatnya, kemampuan material dalam menahan deformasi plastis menurun sehingga nilai kekerasannya menjadi lebih rendah dibandingkan logam dasar maupun daerah nugget. Pada sisi AA5052, penurunan kekerasan lebih dipengaruhi oleh proses anil yang menyebabkan berkurangnya efek penguas akibat deformasi sebelumnya.

Distribusi kekerasan sepanjang penampang sambungan memperlihatkan pola yang khas, yaitu nilai kekerasan meningkat dari daerah HAZ menuju *Nugget Zone* dan kembali menurun pada HAZ sisi lainnya. Pola tersebut menunjukkan bahwa pengaruh panas dan deformasi selama proses FSW tidak terdistribusi secara merata pada seluruh penampang sambungan. Daerah nugget menerima kombinasi panas dan deformasi plastis tertinggi sehingga mengalami penyempurnaan butir, sedangkan HAZ hanya menerima pengaruh termal tanpa deformasi sehingga mengalami pelunakan material. Dengan demikian, variasi struktur mikro pada setiap zona menjadi faktor utama yang menentukan distribusi kekerasan hasil pengelasan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan putar tool sebesar 1460 rpm mampu menghasilkan sambungan *dissimilar* AA5052 dan AA6061 dengan kualitas visual yang baik, struktur makro yang homogen, serta distribusi kekerasan yang dipengaruhi oleh perubahan mikrostruktur akibat proses FSW. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada *Nugget Zone* karena terbentuknya butiran halus hasil rekristalisasi dinamis, sedangkan nilai terendah berada pada HAZ sisi AA6061 akibat pelarutan presipitat dan pertumbuhan butir. Hasil ini menunjukkan bahwa kecepatan putar tool memiliki peranan penting dalam mengendalikan pembentukan struktur mikro dan distribusi kekerasan pada sambungan FSW *dissimilar* aluminium, sehingga pemilihan parameter yang tepat menjadi faktor utama dalam memperoleh kualitas sambungan yang optimal.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh kecepatan putar tool sebesar 1460 rpm terhadap distribusi kekerasan sambungan *dissimilar* AA5052 dan AA6061 hasil *Friction Stir Welding* (FSW), dapat disimpulkan bahwa parameter tersebut mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas visual yang baik tanpa ditemukannya cacat berupa retak, porositas, maupun *lack of penetration*. Meskipun terbentuk *flash* pada sisi *retreating side*, fenomena tersebut tidak memengaruhi kontinuitas sambungan dan menunjukkan bahwa panas yang dihasilkan selama proses pengelasan cukup untuk menghasilkan aliran material yang optimal.

Hasil pengamatan makro dan mikro menunjukkan terbentuknya zona karakteristik FSW yang terdiri atas *Nugget Zone* (NZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *Heat Affected Zone* (HAZ). Pada *Nugget Zone* terbentuk struktur butir halus (*equiaxed grain*) akibat rekristalisasi dinamis yang dipicu oleh kombinasi panas gesekan dan deformasi plastis selama proses pengelasan. Selain itu, pola *onion ring* yang terlihat pada penampang sambungan mengindikasikan bahwa proses pencampuran material AA5052 dan AA6061 berlangsung dengan baik sehingga menghasilkan ikatan metalurgi yang homogen.

Distribusi kekerasan mikro menunjukkan bahwa nilai kekerasan tertinggi berada pada *Nugget Zone* dengan nilai sekitar 70,5 HV sebagai akibat penyempurnaan ukuran butir, sedangkan nilai kekerasan terendah berada pada daerah HAZ sisi AA6061 (*retreating side*) sebesar 49,6 HV akibat pelarutan presipitat penguas dan pertumbuhan butir selama siklus termal pengelasan. Pola distribusi tersebut menunjukkan bahwa kecepatan putar tool memiliki peranan penting dalam mengendalikan pembentukan struktur mikro dan sifat mekanik sambungan.

Secara keseluruhan, kecepatan putar tool 1460 rpm mampu menghasilkan sambungan *dissimilar* AA5052 dan AA6061 dengan struktur makro yang baik, mikrostruktur yang homogen pada *Nugget Zone*, serta distribusi kekerasan yang dipengaruhi oleh perubahan ukuran butir dan evolusi mikrostruktur pada setiap zona pengelasan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengendalian kecepatan putar tool merupakan faktor penting dalam memperoleh kualitas sambungan FSW yang optimal serta dapat dijadikan acuan dalam pengembangan proses penyambungan material aluminium *dissimilar* untuk aplikasi rekayasa.

5. Daftar Pustaka

- [1] Mishra RS, Ma ZY. *Friction Stir Welding and processing*. Mater Sci Eng R. 2005;50(1-2):1–78.
- [2] Kumar K, Kailas SV. The role of *Friction Stir Welding* tool on material flow and *Weld* formation. Mater Sci Eng A. 2008;485(1-2):367–374.
- [3] Verma SM, Misra JP, Singh S. Influence of *Welding* parameters on FSW joints. J Mater Eng Perform. 2021;30:5412–5422.
- [4] Banik A, Saha SC, Barma JD. Tool design and wear characteristics in *Friction Stir Welding*. Mater Today Proc. 2021;44:1125–1130.
- [5] Hofmann DC, Vecchio KS. Submerged *Friction Stir* processing. Mater Sci Eng A. 2014;402:234–241.

-
- [6] Gupta MK, Kumar N. Microstructural evolution in *Friction Stir Welded* aluminum alloys. *Mater Res Express*. 2020;7:026501.
 - [7] Uzun H, Dalle Donne C, Argagnotto A. *Friction Stir Welding of dissimilar Al alloys*. *Mater Des*. 2005;26:41–46.
 - [8] Callister WD. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 8th ed. New York: Wiley; 2010.
 - [9] ASTM International. ASTM E384 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. West Conshohocken; 2022.
 - [10] ASTM International. ASTM E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken; 2024.