

The Effect of Underwater Friction Stir Spot Welding Process Parameters on Brinell Hardness and AA1100 Alloy Joint Microstructure

[Pengaruh Parameter Proses Underwater Friction Stir Spot Welding Terhadap Kekerasan Brinell dan Mikrostruktur Sambungan Paduan AA1100]

Muhammad Feri Setiawan¹⁾, Mulyadi^{*2)}

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

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

Abstract. *Underwater Friction Stir Spot Welding (UFSSW) is a development of the Friction Stir Spot Welding (FSSW) process that utilizes a water medium as a cooling environment to control heat input and cooling rate during welding. This study aims to analyze the effects of UFSSW process parameters on the Brinell hardness and microstructural characteristics of AA1100 aluminum alloy joints. The investigated parameters include tool rotational speed, water medium temperature, and holding time, arranged using the Taguchi L9 (3³) design of experiments. Brinell hardness testing was conducted on both the front and back sides of the joints, while microstructural observations were performed in the Base Metal (BM), Heat Affected Zone (HAZ), Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ), and Weld Nugget (WN) regions. Statistical analyses were carried out using ANOVA, F-value evaluation, and main effects plots. The results indicate that the Brinell hardness on the front side of the joint is generally higher than that on the back side, with the maximum hardness occurring in regions close to the Weld Nugget. Microstructural observations reveal that the Weld Nugget exhibits the densest and most homogeneous microstructure, resulting from intense plastic deformation and dynamic recrystallization enhanced by water cooling, which directly correlates with increased hardness. ANOVA results show that holding time and water medium temperature have a significant effect on joint hardness (p -value < 0.05), whereas tool rotational speed does not show a significant effect within the investigated parameter range. These findings demonstrate that thermal-related parameters and process duration are the dominant factors controlling the hardness and microstructure of UFSSW AA1100 aluminum joints, highlighting the importance of proper parameter control to achieve optimal mechanical properties.*

Keywords - *Underwater Friction Stir Spot Welding; AA1100 Aluminum; Brinell Hardness; Microstructure; Taguchi Method; ANOVA*

Abstrak. *Underwater Friction Stir Spot Welding (UFSSW) merupakan pengembangan dari proses Friction Stir Spot Welding (FSSW) yang memanfaatkan media air sebagai pendingin untuk mengendalikan input panas dan laju pendinginan selama proses pengelasan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter proses UFSSW terhadap kekerasan Brinell dan karakteristik mikrostruktur sambungan aluminium AA1100. Parameter proses yang divariasikan meliputi kecepatan putar tool, temperatur media air, dan holding time, yang disusun menggunakan metode Taguchi Design of Experiment L9 (3³). Pengujian kekerasan Brinell dilakukan pada sisi depan dan sisi belakang sambungan, sedangkan pengamatan mikrostruktur dilakukan pada zona Base Metal (BM), Heat Affected Zone (HAZ), Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ), dan Weld Nugget (WN). Analisis statistik dilakukan menggunakan ANOVA, serta evaluasi nilai F dan plot efek utama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekerasan Brinell pada sisi depan sambungan lebih tinggi dibandingkan sisi belakang, dengan nilai maksimum berada di daerah yang dekat dengan Weld Nugget. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa zona Weld Nugget memiliki mikrostruktur paling padat dan homogen akibat deformasi plastis intens dan rekristalisasi dinamik yang diperkuat oleh pendinginan air, sehingga berkorelasi langsung dengan peningkatan kekerasan. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa holding time dan temperatur media air berpengaruh signifikan terhadap kekerasan sambungan (p -value < 0,05), sedangkan kecepatan putar tool tidak berpengaruh signifikan dalam rentang parameter yang digunakan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa parameter termal dan waktu proses merupakan faktor dominan dalam mengendalikan kekerasan dan mikrostruktur sambungan UFSSW aluminium AA1100, sehingga pengendalian parameter tersebut menjadi kunci untuk memperoleh sambungan dengan sifat mekanik yang optimal.*

Kata Kunci - *Underwater Friction Stir Spot Welding; Aluminium AA1100; Kekerasan Brinell; Mikrostruktur; Taguchi; ANOVA*

I. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan salah satu proses penyambungan logam yang paling banyak digunakan dalam industri manufaktur, terutama pada sektor otomotif, kelistrikan, dan konstruksi. Metode pengelasan fusi konvensional seperti *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) masih banyak diterapkan, namun memiliki keterbatasan berupa distorsi termal, porositas, serta risiko retak akibat siklus pemanasan dan pendinginan yang tidak terkendali [1][2]. Keterbatasan tersebut mendorong pengembangan teknologi pengelasan *solid-state* yang mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas lebih baik dan cacat termal yang minimal [3]. Meskipun metode ini cukup efektif, namun pengelasan fusi memiliki beberapa keterbatasan, antara lain risiko deformasi *Thermal*, porositas, dan retak akibat pemanasan yang tinggi serta pendinginan yang tidak terkendali.

Friction Stir Welding (FSW) merupakan salah satu metode *solid-state welding* yang bekerja tanpa mencairkan logam induk, melainkan memanfaatkan panas gesekan dan deformasi plastis akibat *Tool* berputar[4]. Seiring berkembangnya kebutuhan industri pada komponen berdimensi kecil dan presisi tinggi, dikembangkan varian *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) yang menghasilkan sambungan titik (*spot joint*) [5]. FSSW banyak diaplikasikan pada struktur pelat tipis, namun pada material aluminium masih terdapat tantangan terkait kontrol panas dan kualitas mikrostruktur sambungan [6]. FSW juga diterapkan secara lokal dalam bentuk titik-titik sambungan dan sangat sesuai untuk aplikasi pada industri otomotif, dirgantara, dan elektronik.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dikembangkan metode *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW), yaitu proses FSSW yang dilakukan di dalam media air sebagai pendingin. Lingkungan berpendingin ini mampu menurunkan puncak temperatur proses, mempercepat laju pendinginan, serta menekan pertumbuhan mikrostruktur yang berlebihan[7]. Beberapa penelitian melaporkan bahwa pendinginan air pada proses FSW atau FSSW dapat menghasilkan mikrostruktur yang lebih halus dan meningkatkan sifat mekanik sambungan dibandingkan proses yang dilakukan di udara.

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah aluminium paduan AA1100, yang merupakan aluminium komersial dengan kemurnian tinggi dan memiliki konduktivitas termal serta ketahanan korosi yang baik[8]. AA1100 banyak digunakan pada industri kelistrikan dan manufaktur ringan, namun memiliki kekuatan mekanik yang relatif rendah sehingga sensitif terhadap perubahan mikrostruktur akibat proses pengelasan [9]. Oleh karena itu, pengendalian parameter proses UFSSW menjadi sangat penting untuk memperoleh sambungan dengan sifat mekanik yang optimal.

Berdasarkan kajian literatur, sebagian besar penelitian sebelumnya berfokus pada FSW dan FSSW konvensional pada aluminium [10], sementara kajian mengenai pengaruh parameter proses UFSSW terhadap kekerasan *Brinell* dan mikrostruktur sambungan titik aluminium AA1100 masih terbatas [11][12][13]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter proses UFSSW, yaitu kecepatan putar *Tool*, temperatur media air, dan waktu penahanan, terhadap kekerasan *Brinell* dan karakteristik mikrostruktur sambungan aluminium AA1100 [14][15][16]. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi pengelasan *solid-state* berpendingin air serta menjadi acuan teknis bagi aplikasi industri logam ringan.

II. METODE

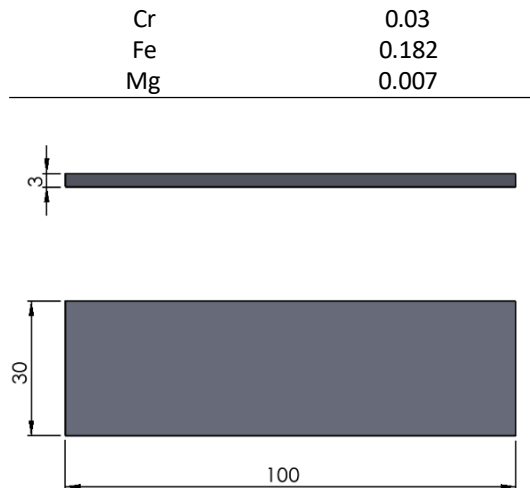
Penelitian eksperimen ini bertujuan untuk mengevaluasi bagaimana parameter proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) memengaruhi kekerasan *Brinell* dan mikrostruktur sambungan aluminium AA1100. Untuk melakukan ini, metode kuantitatif digunakan, menggunakan analisis statistik.

A. Material dan Peralatan

Material yang Penelitian ini menggunakan aluminium paduan AA1100 dengan kemurnian sekitar 99%. Pelat dengan panjang 100 mm, lebar 20 mm, dan tebal 3 mm dibuat dalam konfigurasi lap joint. Aluminium AA1100 dipilih karena konduktivitas termalnya yang tinggi dan ketahanan korosi, dan banyak digunakan dalam aplikasi industri ringan. Namun, karena sifat mekaniknya yang rendah, aluminium menjadi sensitif terhadap perubahan mikrostruktur yang disebabkan oleh proses pengelasan. Komposisi material AA1100, Pada **Tabel 2.1**, dan desain ukuran material pada **Gambar 2.1**.

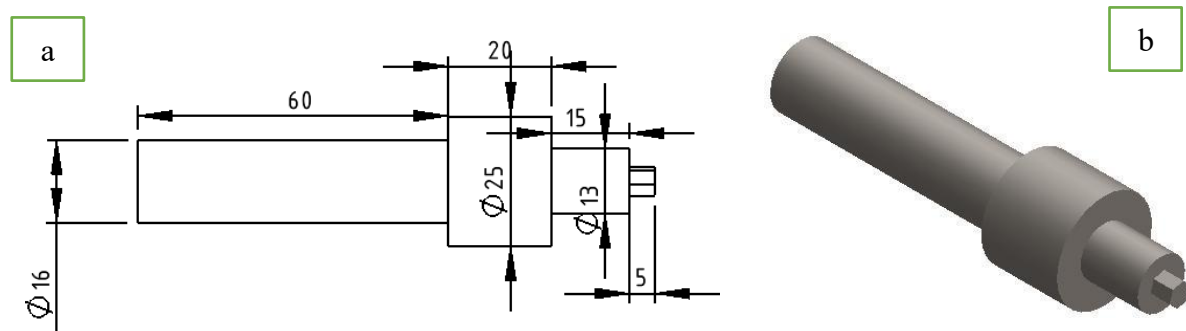
Tabel 2. 1 Material Komposisi AA1100

Element	Composition (wt %)
Al	99.3
Zn	0.006
Mn	0.016
Si	0.138
Cu	0.009



Gambar 2. 1 Desain ukuran material AA1100

Tool UFSSW dibuat dari material baja ST-90 dengan desain pin hexagonal, yang bertujuan untuk meningkatkan efektivitas pengadukan mekanis dan homogenitas aliran material selama proses pengelasan. Proses UFSSW dilakukan menggunakan mesin milling, sedangkan pembuatan *Tool* dilakukan dengan mesin bubut dan CNC milling. Media pendingin yang digunakan adalah air tawar dengan variasi suhu tertentu. Berikut desain *Tool* UFSSW pada **Gambar 2.2.**



Gambar 2. 2 (a) Desain 2D *Tool* UFSSW, (b) Desain 3D *Tool* UFSSW

B. Parameter Proses UFSSW

Proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) dalam penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan tiga parameter proses utama yang berpengaruh terhadap input panas, aliran plastis material, serta pembentukan mikrostruktur sambungan, yaitu kecepatan putar *Tool*, suhu media air, dan waktu penahanan (*dwell time*), yang bisa dilihat pada **Tabel 2.2.**

Tabel 2. 2 Parameter Proses

No.	Parameter Proses	Unit	Notasi	Level 1	Level 2	Level 3
1	Kecepatan putar <i>tool</i>	rpm	N	1000	1100	1200
2	Temperatur media air	°C	WT	8	29	60
3	<i> Holding time</i>	s	HT	4	7	10

Untuk memperoleh rancangan eksperimen yang efisien dengan jumlah percobaan minimum namun tetap mampu merepresentasikan pengaruh masing-masing parameter secara signifikan, digunakan metode *Taguchi Design of Experiment* (DOE) dengan *orthogonal array* L9 (3^3). Metode *Taguchi* dipilih karena mampu mengevaluasi pengaruh parameter proses secara sistematis dengan variasi level yang seimbang, serta banyak digunakan dalam penelitian proses manufaktur dan pengelasan.

Orthogonal array L9 memungkinkan kombinasi tiga faktor dengan tiga level hanya dalam sembilan percobaan, sehingga mengurangi jumlah eksperimen dibandingkan rancangan faktorial penuh, tanpa mengurangi kualitas

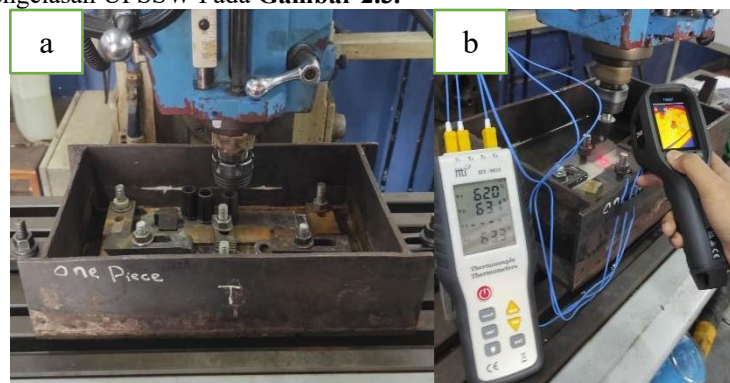
informasi yang diperoleh. Susunan kombinasi parameter proses UFSSW berdasarkan *Taguchi* L9 ditunjukkan pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2. 3 Rancangan Eksperimen *Taguchi* L9 (3^3). untuk Proses UFSSW

No. Kode	Kecepatan Rotasi RPM	Suhu Air °C	Waktu Penahan (detik)	Kekerasan <i>Brinell</i> (HB)	Mikrostruktur (Kerapatan Struktur)
A	1000	8	4		
B	1000	29	7		
C	1000	60	10		
D	1100	8	4		
E	1100	29	7		
F	1100	60	10		
G	1200	8	4		
H	1200	29	7		
I	1200	60	10		

C. Proses Pengelasan UFSSW

Proses UFSSW dilakukan dengan menempatkan spesimen aluminium AA1100 di dalam bak berisi air sesuai suhu yang telah ditentukan. *Tool* diputar pada kecepatan tertentu kemudian ditekan ke permukaan spesimen hingga mencapai kedalaman yang ditentukan dan ditahan sesuai variasi waktu penahanan. Panas yang dihasilkan berasal dari gesekan antara *Tool* dan material serta deformasi plastis material tanpa mencairkan logam induk. Setelah proses pengelasan selesai, spesimen dibiarkan mengalami pendinginan alami di dalam media air. Berikut adalah Bak tanki UFSSW, dan Proses Pengelasan UFSSW Pada **Gambar 2.3**.

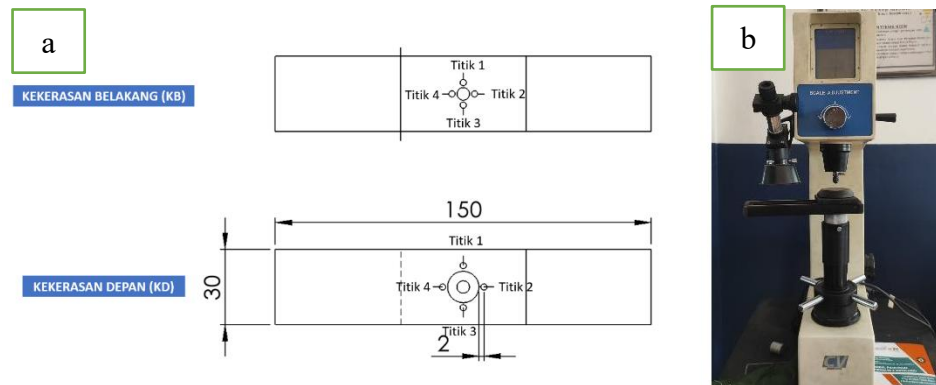


Gambar 2. 3 (a) Bak Tanki UFSSW, (b) Proses Pengelasan UFSSW

D. Pengujian Kekerasan *Brinell*

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Brinell Hardness Test* dengan bola indenter berdiameter 2,5 mm dan beban penekanan sebesar 613 N. Pengujian dilakukan pada beberapa titik yang mewakili zona *Base Metal* (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *Stir Zone* (SZ). Nilai kekerasan *Brinell* (HB) digunakan untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanik akibat variasi parameter proses UFSSW.

Pengukuran kekerasan dilakukan pada dua sisi sambungan, yaitu sisi depan (Kekerasan Depan/KD) dan sisi belakang (Kekerasan Belakang/KB), untuk mengevaluasi distribusi kekerasan secara menyeluruh akibat penetrasi *Tool* dan perbedaan input panas selama proses pengelasan. Alat Uji dan posisi titik pengujian kekerasan *Brinell* ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.

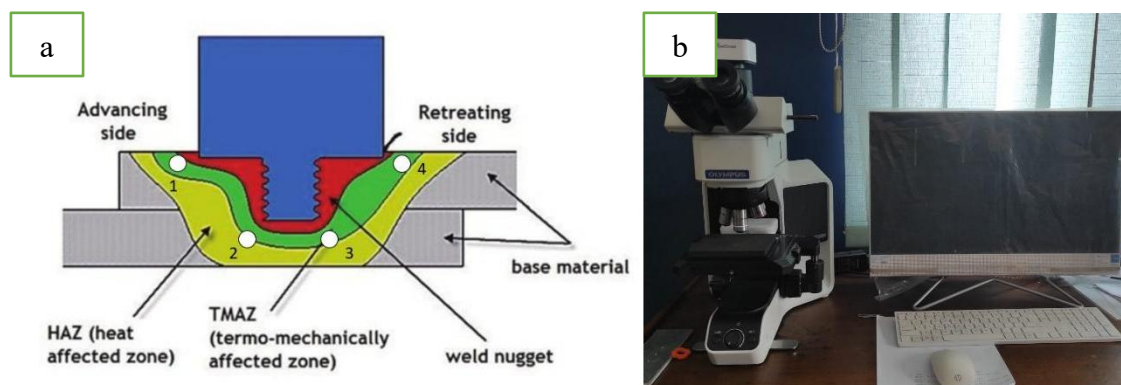


Gambar 2. 4 (a) Tata Letak posisi titik Kekerasan *Brinell* (b) Alat uji Kekerasan *Brinell*

E. Pengamatan Mikrostruktur

Pengamatan mikrostruktur dilakukan menggunakan mikroskop metalurgi pada spesimen yang telah dipreparasi melalui proses pengamplasan, pemolesan, dan etsa menggunakan *Keller's reagent*. Pengamatan difokuskan pada identifikasi perubahan ukuran dan bentuk butir serta pembagian zona mikrostruktur (BM, HAZ, TMAZ, dan SZ) akibat proses UFSSW. Hasil pengamatan mikrostruktur digunakan untuk mengkorelasikan perubahan struktur mikro dengan nilai kekerasan sambungan.

Pada Gambar 2.5 menunjukkan bahwa distribusi zona termal dan deformasi plastis yang terjadi selama proses UFSSW menentukan alat uji mikrostruktur dan desain posisi titik pengamatan mikrostruktur. Zona mikrostruktur utama ini adalah Base Metal (BM), Zone Affected Heat (HAZ), Zone Thermo-Mechanically Affected (TMAZ), dan Stir Zone atau *Weld Nugget* (SZ).



Gambar 2. 5 (a) Posisi Titik Pengamatan Mikrostruktur, (b) Alat uji Mikrostruktur

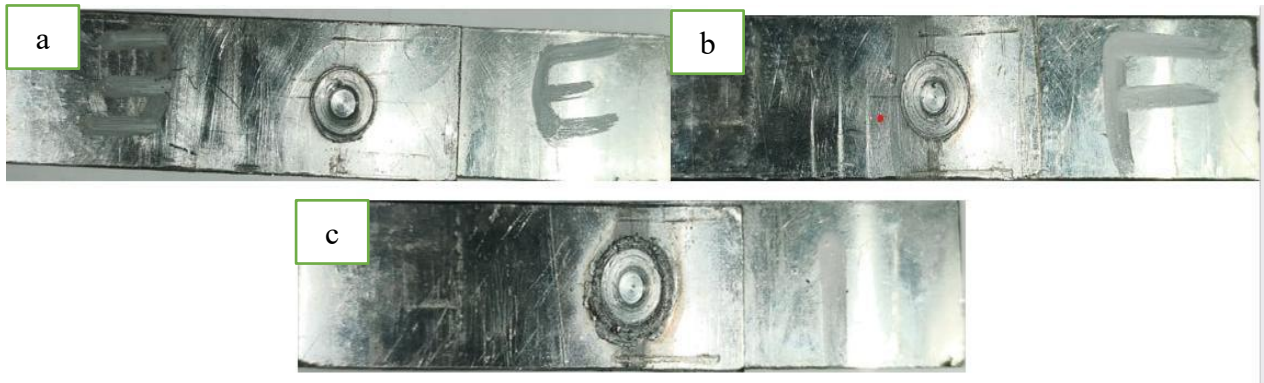
F. Analisis Statistik

Data hasil pengujian kekerasan dianalisis menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA) dengan tingkat signifikansi 95% ($\alpha = 0,05$) untuk mengetahui pengaruh signifikan masing-masing parameter proses UFSSW. Analisis ini digunakan untuk menentukan parameter dominan serta kombinasi parameter optimum yang menghasilkan nilai kekerasan terbaik pada sambungan aluminium AA1100.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Visual Sambungan Hasil *Under Water Friction Stir Spot Welding* (UFSSW)

Hasil visual sambungan aluminium AA1100 setelah proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) ditunjukkan pada Gambar 3.1 pada penelitian ini dilakukan sebanyak sembilan kali pengelasan sesuai dengan rancangan eksperimen *Taguchi* L9, dengan variasi parameter kecepatan putar *Tool*, suhu media air, dan waktu penahanan. Untuk keperluan penyajian pada artikel ini, tidak seluruh hasil visual dari sembilan sambungan ditampilkan, melainkan dipilih tiga sampel representatif berdasarkan hasil pengujian kekerasan *Brinell*, yaitu sambungan dengan nilai kekerasan maksimum, nilai kekerasan minimum, serta spesimen validasi, yang mewakili rentang performa sambungan UFSSW yang dihasilkan.



Gambar 3. 1 (a) Hasil UFSSW dengan Kekerasan Maksimum (b) Hasil UFSSW dengan Kekerasan Minimum
(c) Hasil UFSSW dengan Kekerasan Validasi

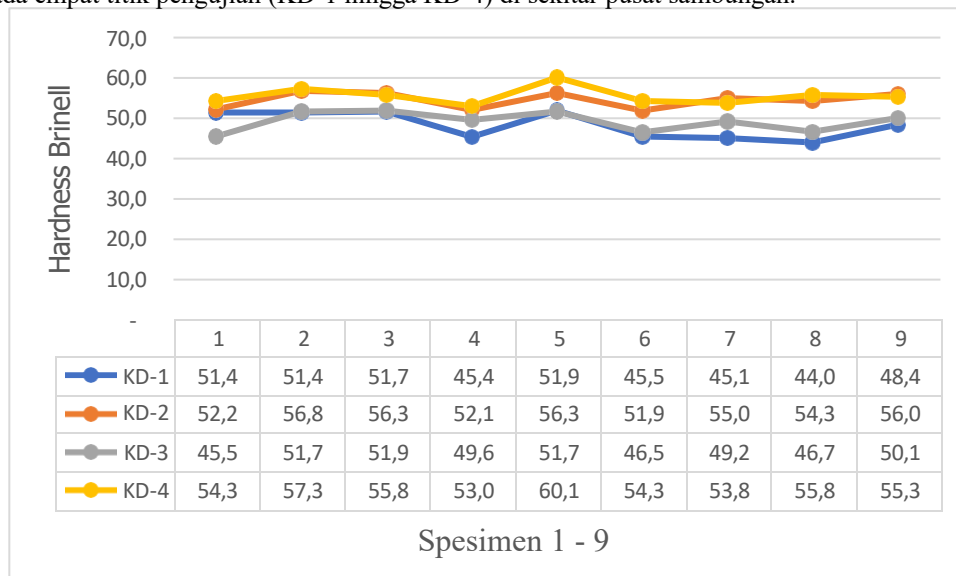
Pemilihan ketiga sampel tersebut bertujuan untuk merepresentasikan rentang performa sambungan UFSSW yang dihasilkan dari variasi parameter proses, sekaligus untuk memudahkan analisis hubungan antara kondisi visual sambungan, distribusi kekerasan, dan karakteristik mikrostruktur.

Hasil visual sambungan ini mengkonfirmasi bahwa sambungan UFSSW terbentuk dengan baik dan layak untuk dianalisis lebih lanjut melalui pengujian kekerasan *Brinell* dan pengamatan mikrostruktur, yang dibahas pada subbab berikutnya.

B. Uji Kekerasan *Brinell*

1. Kekerasan *Brinell* sisi depan (KD)

Pengamatan Distribusi nilai kekerasan *Brinell* pada sisi depan sambungan (Kekerasan Depan/KD) hasil proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) ditunjukkan pada **Gambar 3.2**. Grafik tersebut memperlihatkan variasi nilai kekerasan untuk sembilan spesimen berdasarkan rancangan eksperimen *Taguchi* L9, dengan pengukuran dilakukan pada empat titik pengujian (KD-1 hingga KD-4) di sekitar pusat sambungan.

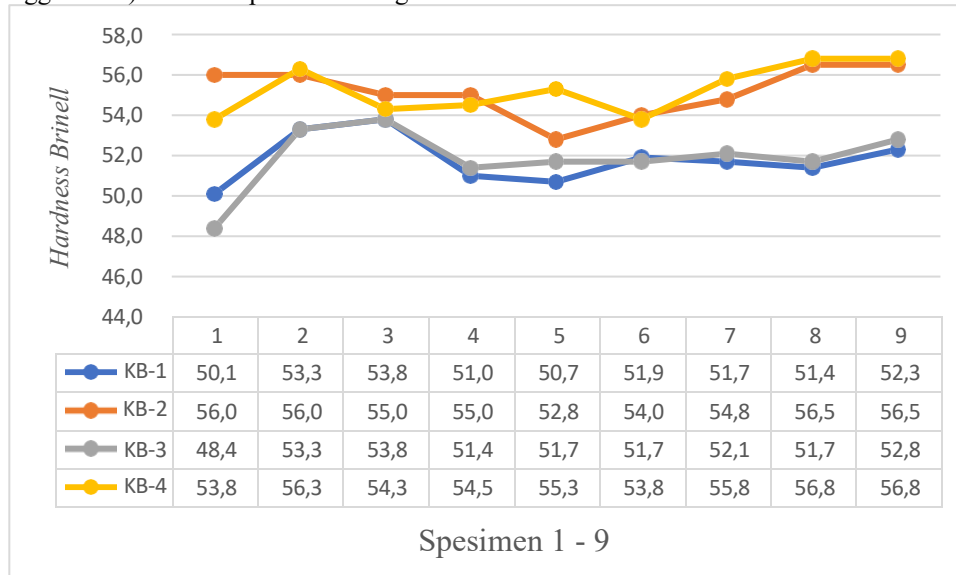


Gambar 3. 2 Nilai Grafik Kekerasan Depan

Berdasarkan Grafik, nilai kekerasan *Brinell* sisi depan berada pada rentang 44,0–60,1 HB, dengan nilai maksimum sebesar 60,1 HB diperoleh pada titik KD-4 spesimen ke-5, yaitu titik yang paling dekat dengan *Stir Zone* (SZ). Tingginya nilai kekerasan pada titik ini disebabkan oleh deformasi plastis dan pengadukan material yang intens, yang memicu terjadinya rekristalisasi dinamik dan pembentukan butir halus. Sebaliknya, nilai kekerasan terendah sekitar 44,0 HB diperoleh pada titik KD-1 dan KD-3, yang berada lebih jauh dari pusat sambungan dan merepresentasikan daerah TMAZ–HAZ, di mana material hanya mengalami pengaruh panas sehingga memungkinkan pertumbuhan butir. Secara umum, KD-4 secara konsisten menunjukkan nilai kekerasan tertinggi, yang menegaskan bahwa kedekatan terhadap zona aduk dan kontak langsung dengan *shoulder Tool* merupakan faktor dominan dalam peningkatan kekerasan sisi depan sambungan.

2. Kekerasan *Brinell* sisi belakang (KB)

Distribusi nilai kekerasan *Brinell* pada sisi belakang sambungan (Kekerasan Belakang/KB) hasil proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) ditunjukkan pada **Gambar 3.3**. Grafik memperlihatkan variasi nilai kekerasan untuk sembilan spesimen berdasarkan rancangan *Taguchi* L9, dengan pengukuran dilakukan pada empat titik (KB-1 hingga KB-4) di sekitar pusat sambungan.

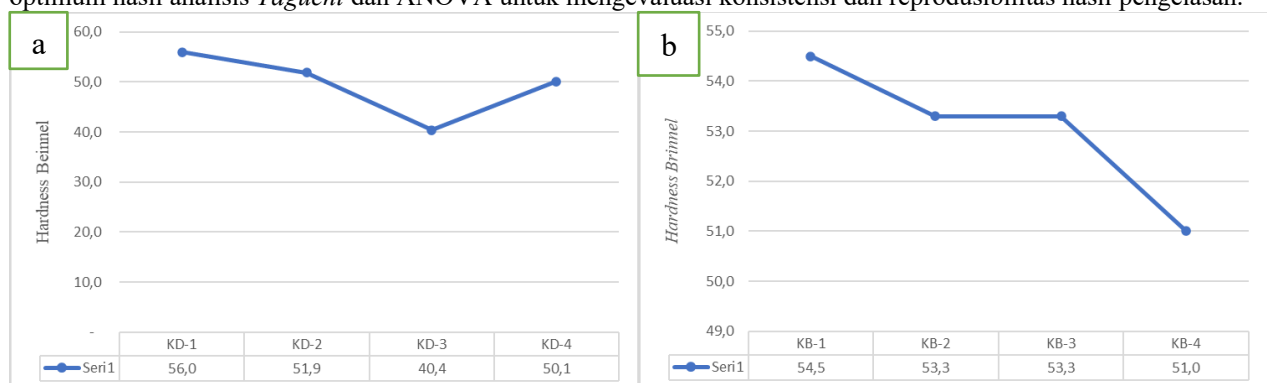


Gambar 3.3 Nilai Grafik Kekerasan Belakang

Distribusi nilai kekerasan *Brinell* pada sisi belakang sambungan (KB) hasil proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) menunjukkan nilai pada kisaran 48,4–56,8 HB, dengan variasi yang relatif lebih sempit dibandingkan sisi depan. Berdasarkan grafik, nilai kekerasan tertinggi umumnya diperoleh pada titik KB-4, khususnya pada spesimen ke-8 dan ke-9 dengan nilai mencapai 56,8 HB, yang menunjukkan pengaruh zona aduk (*Stir Zone*) masih mencapai bagian bawah sambungan. Sebaliknya, nilai kekerasan terendah sebesar 48,4 HB terjadi pada titik KB-3 spesimen ke-1, yang berada lebih jauh dari pusat sambungan dan merepresentasikan daerah transisi menuju TMAZ–HAZ. Secara keseluruhan, nilai kekerasan sisi belakang lebih rendah dan lebih homogen dibandingkan sisi depan, yang disebabkan oleh input panas dan deformasi plastis yang lebih kecil karena tidak adanya kontak langsung dengan *shoulder Tool*, sehingga terbentuk gradien sifat mekanik sepanjang ketebalan sambungan UFSSW.

3. Kekerasan *Brinell* sisi belakang (KB)

Hasil pengujian kekerasan *Brinell* pada spesimen validasi ditunjukkan pada **Gambar 3.4**, baik untuk sisi depan (KD) maupun sisi belakang (KB) sambungan UFSSW. Spesimen validasi dipilih berdasarkan kombinasi parameter optimum hasil analisis *Taguchi* dan ANOVA untuk mengevaluasi konsistensi dan reproduktibilitas hasil pengelasan.



Gambar 3.4 Grafik hasil uji kekerasan *Brinell* spesimen validasi sambungan UFSSW aluminium AA1100: (a) sisi depan (KD), (b) sisi belakang (KB)

Hasil uji kekerasan *Brinell* pada spesimen validasi untuk sisi depan (KD) dan sisi belakang (KB) sambungan UFSSW aluminium AA1100. Berdasarkan grafik, nilai kekerasan sisi depan berada pada rentang 40,4–56,0 HB, dengan nilai tertinggi pada titik KD-1 (56,0 HB) dan nilai terendah pada titik KD-3 (40,4 HB). Sementara itu, nilai kekerasan sisi belakang berada pada rentang 51,0–54,5 HB, dengan kecenderungan nilai yang lebih homogen

dibandingkan sisi depan. Secara umum, nilai kekerasan sisi depan lebih tinggi dibandingkan sisi belakang, yang mengindikasikan bahwa deformasi plastis dan pengadukan material lebih dominan terjadi pada permukaan yang bersentuhan langsung dengan *shoulder Tool*. Kesesuaian pola kekerasan antara spesimen validasi dan hasil eksperimen utama menunjukkan bahwa parameter proses UFSSW yang dipilih menghasilkan sambungan dengan karakteristik mekanik yang konsisten dan dapat diulang.

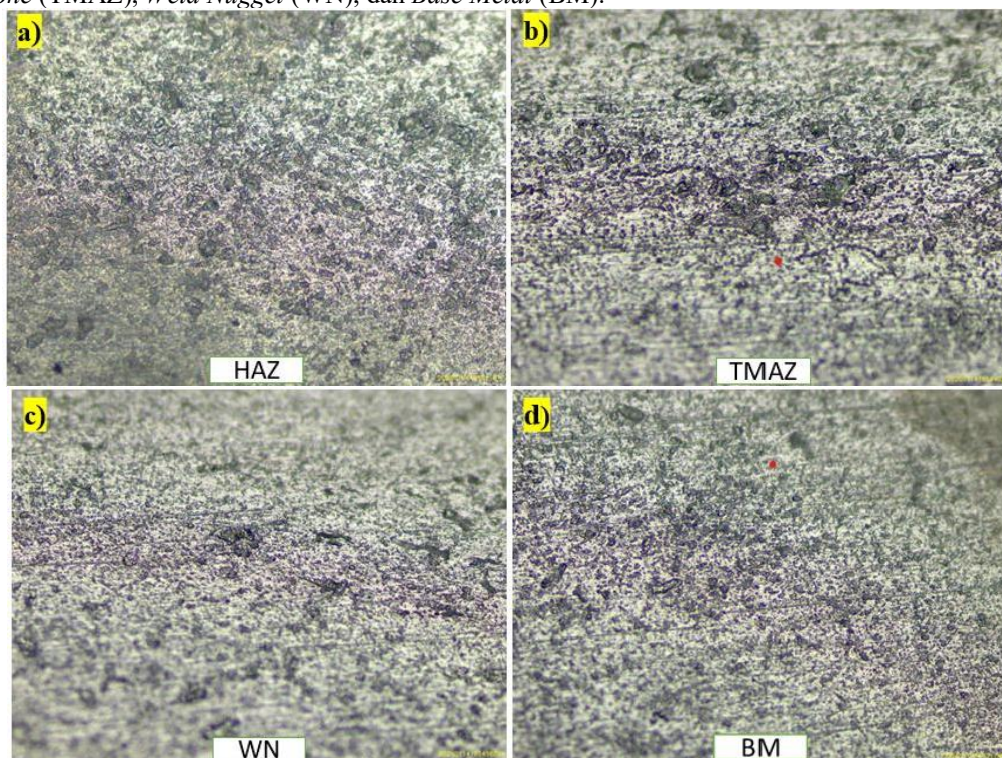
4. Perbandingan Kekerasan *Brinell* Sisi Depan (KD) dan Sisi Belakang (KB)

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan *Brinell* pada seluruh spesimen, termasuk hasil eksperimen *Taguchi* L9 dan spesimen validasi, dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan sisi depan (KD) secara konsisten lebih tinggi dibandingkan sisi belakang (KB). Perbedaan ini disebabkan oleh kontak langsung antara *shoulder Tool* dengan permukaan atas sambungan, yang menghasilkan input panas, deformasi plastis, dan intensitas pengadukan material yang lebih besar pada sisi depan. Kondisi tersebut mendorong terjadinya rekristalisasi dinamik yang lebih intens dan pembentukan mikrostruktur butir halus di sekitar *Stir Zone* (SZ), sehingga meningkatkan nilai kekerasan. Sebaliknya, sisi belakang menerima pengaruh panas dan deformasi plastis yang lebih rendah, sehingga nilai kekerasannya lebih homogen dan relatif lebih kecil. Temuan ini menunjukkan adanya gradien sifat mekanik sepanjang ketebalan sambungan UFSSW, yang selanjutnya dapat dikaitkan dengan perbedaan karakteristik mikrostruktur pada masing-masing zona sambungan.

C. Pengamatan Mikrostruktur

1. Pengamatan Mikrostruktur pada Kekerasan Maksimum

Pada **Gambar 3.5** (a-d) menunjukkan hasil pengamatan mikrostruktur sambungan aluminium AA1100 hasil proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) pada spesimen dengan nilai kekerasan maksimum. Pengamatan dilakukan pada beberapa zona utama sambungan, yaitu *Heat Affected Zone* (HAZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), *Weld Nugget* (WN), dan *Base Metal* (BM).



Gambar 3. 5 Mikrostruktur sambungan UFSSW aluminium AA1100 pada kondisi kekerasan maksimum, dengan perbesaran 200x: (a) HAZ, (b) TMAZ, (c) *Weld Nugget* (WN), dan (d) *Base Metal* (BM)

Pada *Base Metal* (BM) (Gambar d), mikrostruktur menunjukkan susunan butir yang relatif renggang dengan jarak antar batas butir yang lebih besar. Kondisi ini mencerminkan tidak adanya pengaruh deformasi plastis selama proses UFSSW, sehingga kepadatan mikrostruktur rendah dan berkorelasi dengan nilai kekerasan yang lebih rendah dibandingkan daerah sambungan.

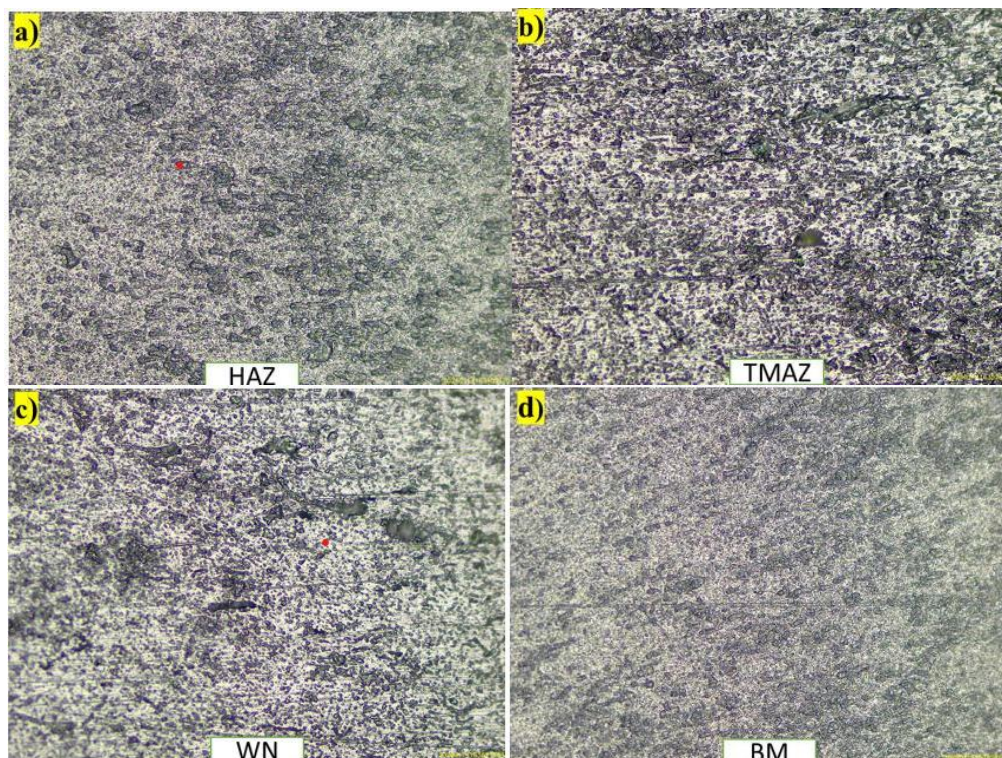
Mikrostruktur pada *Heat Affected Zone* (HAZ) (Gambar a) masih memperlihatkan struktur butir yang cenderung renggang, akibat paparan panas tanpa disertai deformasi plastis yang signifikan. Kondisi ini memungkinkan terjadinya pelebaran jarak antar butir, sehingga kepadatan mikrostruktur menurun dan menyebabkan penurunan nilai kekerasan pada daerah HAZ.

Pada *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ) (Gambar b), mikrostruktur menunjukkan kepadatan butir yang lebih tinggi dibandingkan HAZ, sebagai akibat dari kombinasi pengaruh panas dan deformasi plastis sedang. Zona ini merupakan daerah transisi, di mana jarak antar butir mulai menyempit dan nilai kekerasan berada pada tingkat menengah.

Sementara itu, pada *Weld Nugget* (WN) (Gambar c), terlihat mikrostruktur dengan susunan butir yang paling padat dan homogen. Kepadatan mikrostruktur yang tinggi ini terbentuk akibat deformasi plastis intensif dan rekristalisasi dinamik selama proses UFSSW, yang diperkuat oleh pendinginan cepat dari media air. Kondisi ini secara langsung berkorelasi dengan nilai kekerasan *Brinell* tertinggi yang diperoleh pada spesimen ini, khususnya pada titik pengujian yang berada paling dekat dengan pusat nugget las.

2. Pengamatan Mikrostruktur pada Kekerasan Minimum

Pada **Gambar 3.6** (a–d) menunjukkan hasil pengamatan mikrostruktur sambungan aluminium AA1100 hasil proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) pada spesimen dengan nilai kekerasan minimum. Pengamatan dilakukan pada zona *Heat Affected Zone* (HAZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), *Weld Nugget* (WN), dan *Base Metal* (BM).



Gambar 3. 6 Mikrostruktur sambungan UFSSW aluminium AA1100 pada kondisi kekerasan minimum, dengan perbesaran 200x: (a) HAZ, (b) TMAZ, (c) *Weld Nugget* (WN), dan (d) *Base Metal* (BM)

Pada *Base Metal* (BM) (Gambar d), mikrostruktur memperlihatkan susunan butir yang relatif renggang dan tidak homogen, dengan jarak antar butir yang lebih besar dibandingkan kondisi kekerasan maksimum. Kondisi ini mencerminkan rendahnya kepadatan mikrostruktur, yang berkorelasi dengan nilai kekerasan yang rendah.

Mikrostruktur pada *Heat Affected Zone* (HAZ) (Gambar a) menunjukkan struktur butir yang paling renggang, akibat paparan panas tanpa diimbangi deformasi plastis yang memadai. Jarak antar butir yang semakin melebar menyebabkan penurunan kepadatan mikrostruktur, sehingga nilai kekerasannya pada zona HAZ menjadi yang terendah pada spesimen ini.

Pada *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ) (Gambar b), mikrostruktur masih menunjukkan susunan butir yang kurang padat dan tidak merata. Meskipun zona ini mengalami kombinasi panas dan deformasi plastis, intensitas pengadukan material yang relatif rendah pada kondisi ini belum mampu menghasilkan pemadatan mikrostruktur secara signifikan, sehingga nilai kekerasannya tetap rendah hingga menengah.

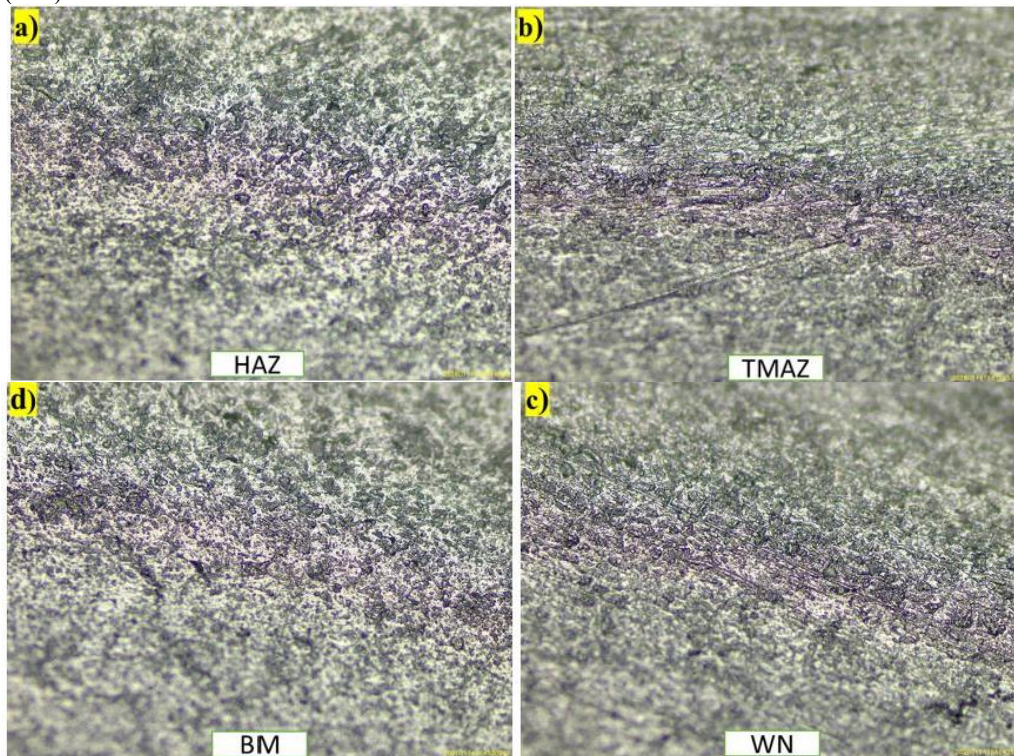
Sementara itu, pada *Weld Nugget* (WN) (Gambar c), meskipun telah terbentuk zona aduk, mikrostruktur yang dihasilkan masih terlihat kurang padat dan tidak homogen dibandingkan *Weld Nugget* pada kondisi kekerasan maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi plastis dan proses rekristalisasi dinamik yang terjadi pada kondisi

ini tidak berlangsung secara optimal, sehingga peningkatan kepadatan mikrostruktur terbatas dan berdampak pada rendahnya nilai kekerasan *Brinell* yang diperoleh.

Hasil pengamatan mikrostruktur pada kondisi kekerasan minimum ini menegaskan bahwa rendahnya kepadatan mikrostruktur, khususnya pada *Weld Nugget* dan zona sekitarnya, merupakan faktor utama penyebab rendahnya nilai kekerasan, yang dipengaruhi oleh kombinasi parameter proses UFSSW yang kurang optimal.

3. Pengamatan Mikrostruktur pada Kekerasan Minimum

Pada **Gambar 3.7** (a-d) menunjukkan hasil pengamatan mikrostruktur sambungan aluminium AA1100 hasil proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) pada spesimen validasi, yang diperoleh dengan menggabungkan parameter optimum dari hasil analisis *Taguchi* dan ANOVA. Pengamatan dilakukan pada zona yang terpengaruh oleh panas (HAZ), zona yang terpengaruh secara termomekanik (TMAZ), pelempar bola (WN), dan bahan dasar (BM).



Gambar 3.7 Mikrostruktur sambungan UFSSW aluminium AA1100 pada kondisi kekerasan Validasi, dengan perbesaran 200x: (a) HAZ, (b) TMAZ, (c) *Weld Nugget* (WN), dan (d) *Base Metal* (BM)

Pada *Base Metal* (BM) (Gambar d), mikrostruktur memperlihatkan susunan butir yang relatif renggang, dengan kepadatan mikrostruktur yang lebih rendah dibandingkan daerah sambungan. Kondisi ini menunjukkan bahwa area BM tidak mengalami pengaruh signifikan dari proses UFSSW, sehingga nilai kekerasannya lebih rendah dibandingkan zona aduk.

Mikrostruktur pada *Heat Affected Zone* (HAZ) (Gambar a) masih menunjukkan struktur butir yang cenderung renggang, meskipun lebih homogen dibandingkan *Base Metal*. Paparan panas tanpa deformasi plastis yang intens menyebabkan kepadatan mikrostruktur pada zona ini belum meningkat secara signifikan, sehingga nilai kekerasannya tetap lebih rendah dibandingkan daerah *Weld Nugget*.

Pada *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ) (Gambar b), mikrostruktur menunjukkan peningkatan kepadatan butir dibandingkan HAZ, akibat adanya kombinasi pengaruh panas dan deformasi plastis sedang. Zona ini berperan sebagai daerah transisi, di mana jarak antar butir mulai menyempit dan nilai kekerasan berada pada tingkat menengah, sesuai dengan hasil uji *Brinell* pada spesimen validasi.

Sementara itu, pada *Weld Nugget* (WN) (Gambar c) terlihat mikrostruktur dengan susunan butir yang paling padat dan relatif homogen. Kepadatan mikrostruktur yang tinggi ini dihasilkan oleh deformasi plastis yang intens dan proses rekristalisasi dinamik selama UFSSW, yang diperkuat oleh pendinginan cepat oleh media air. Kondisi tersebut berkorelasi langsung dengan nilai kekerasan *Brinell* tertinggi pada spesimen validasi, baik pada sisi depan maupun sisi belakang sambungan.

Hasil pengamatan mikrostruktur pada spesimen validasi menunjukkan pola kepadatan mikrostruktur yang konsisten dengan hasil uji kekerasan *Brinell*, serta berada di antara kondisi kekerasan maksimum dan minimum. Hal

ini menegaskan bahwa parameter proses UFSSW yang dipilih mampu menghasilkan sambungan dengan karakteristik mikrostruktur dan kekerasan yang stabil dan dapat diulang.

4. Pembahasan Mikrostruktur terhadap hasil uji Kekerasan

Pembahasan ini menunjukkan bahwa nilai kekerasan *Brinell* sambungan aluminium AA1100 hasil proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) sangat dipengaruhi oleh kepadatan mikrostruktur yang terbentuk akibat distribusi panas dan deformasi plastis selama proses pengelasan. Zona *Weld Nugget* (WN) merupakan area yang paling berperan dalam peningkatan kekerasan. Pada kondisi kekerasan maksimum, mikrostruktur WN terlihat padat dan homogen akibat deformasi plastis intens dan rekristalisasi dinamik, sehingga menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada kondisi kekerasan minimum, mikrostruktur WN relatif kurang padat dan tidak merata, yang menunjukkan bahwa input panas dan deformasi plastis belum optimal sehingga nilai kekerasan yang dihasilkan lebih rendah.

Zona *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ) menunjukkan kepadatan mikrostruktur menengah akibat kombinasi pengaruh panas dan gaya geser, sehingga nilai kekerasannya berada di bawah WN namun lebih tinggi dibandingkan *Heat Affected Zone* (HAZ). Pada zona HAZ, perubahan mikrostruktur terutama dipengaruhi oleh panas tanpa deformasi plastis signifikan, sehingga kepadatan mikrostruktur dan nilai kekerasannya lebih rendah, meskipun pendinginan oleh media air mampu menekan penurunan kekerasan secara berlebihan. Sebagai pembanding, *Base Metal* (BM) menunjukkan mikrostruktur dengan kepadatan paling rendah dan memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 54,03 HB, yang lebih rendah dibandingkan zona WN dan sebagian zona TMAZ. Hal ini menegaskan bahwa proses UFSSW mampu meningkatkan kekerasan material melalui pembentukan mikrostruktur yang lebih padat, khususnya pada zona inti sambungan. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa kepadatan dan homogenitas mikrostruktur—terutama pada zona *Weld Nugget*—merupakan faktor utama yang mengontrol kekerasan *Brinell* sambungan UFSSW aluminium AA1100.

D. Analisis Statistik Pengaruh Parameter Proses UFSSW

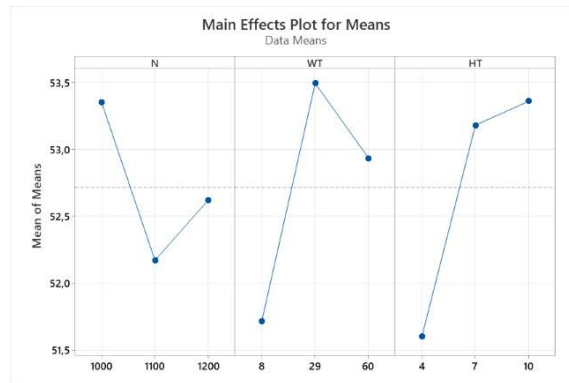
Analisis statistik menggunakan metode *Taguchi* dan General Linear Model (ANOVA) dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) terhadap nilai kekerasan *Brinell* sambungan aluminium AA1100. Berdasarkan hasil ANOVA **Tabel 3.1**, parameter *holding time* (HT) menunjukkan pengaruh paling signifikan terhadap kekerasan sambungan dengan nilai *p-value* 0,038 ($< 0,05$) dan nilai F sebesar 25,20, serta memberikan kontribusi terbesar yaitu 43,40%. Hal ini menunjukkan bahwa lamanya waktu penahanan sangat menentukan besarnya input panas dan intensitas deformasi plastis selama proses UFSSW, yang berperan langsung dalam pembentukan mikrostruktur dan peningkatan kekerasan sambungan.

Tabel 3. 1 Hasil General Linear Model (ANOVA)

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
N	2	2,1246	16,50%	2,1246	1,0623	9,58	0,095
WT	2	4,9426	38,38%	4,9426	2,4713	22,28	0,043
HT	2	5,5898	43,40%	5,5898	2,7949	25,20	0,038
Error	2	0,2218	1,72%	0,2218	0,1109		
Total	8	12,8789	100,00%				

Parameter temperatur media air (WT) juga memberikan pengaruh signifikan terhadap kekerasan sambungan dengan nilai *p-value* 0,043 ($< 0,05$), nilai F sebesar 22,28, dan kontribusi sebesar 38,38%. Temperatur media air berperan dalam mengendalikan laju pendinginan sambungan, sehingga memengaruhi kepadatan dan homogenitas mikrostruktur, khususnya pada zona *Weld Nugget*. Sebaliknya, parameter kecepatan putar *Tool* (N) memiliki nilai *p-value* 0,095 ($> 0,05$) dengan kontribusi 16,50%, sehingga dinyatakan tidak berpengaruh signifikan terhadap kekerasan sambungan pada tingkat kepercayaan 95%. Nilai kontribusi kesalahan yang relatif kecil (1,72%) menunjukkan bahwa model statistik yang digunakan telah merepresentasikan pengaruh parameter proses dengan baik. Secara keseluruhan, hasil analisis ANOVA menegaskan bahwa *holding time* dan temperatur media air merupakan parameter paling dominan dalam mengontrol kekerasan sambungan UFSSW aluminium AA1100, dan temuan ini konsisten dengan hasil pengujian kekerasan serta pengamatan mikrostruktur.



Gambar 3. 8 Grafik *Main Effects Plot for Means*

Analisis Grafik *Main Effects Plot for Means* menunjukkan bahwa temperatur media air (WT) dan *holding time* (HT) memberikan pengaruh paling besar terhadap nilai rata-rata kekerasan Brinell, ditandai dengan perubahan nilai yang paling signifikan antar *level*. Kekerasan maksimum dicapai pada WT level menengah dan HT tertinggi, sedangkan kecepatan putar *tool* (N) menunjukkan pengaruh yang relatif kecil. Hasil ini konsisten dengan analisis ANOVA yang menyatakan WT dan HT sebagai parameter dominan.

Tabel 3. 2 Nilai F Hitung

Parameter Proses	Derajat Bebas (DF)	F Hitung	F Tabel ($\alpha = 0,05$)	P-Value	Keterangan
Kecepatan putar <i>Tool</i> (N)	2	9,58	5,14	0,095	Terima H_0
Temperatur media air (WT)	2	22,28	5,14	0,043	Tolak H_0
<i> Holding time</i> (HT)	2	25,20	5,14	0,038	Tolak H_0

Berdasarkan hasil Nilai F Hitung pada **Tabel 3.3** tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$, diperoleh bahwa *holding time* (HT) dan temperatur media air (WT) memiliki nilai F hitung yang lebih besar dari F tabel (5,14) serta nilai *p-value* $< 0,05$, sehingga hipotesis nol (H_0) ditolak dan kedua parameter tersebut dinyatakan berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan Brinell sambungan UFSSW aluminium AA1100. Sebaliknya, kecepatan putar *tool* (N) memiliki nilai F hitung yang lebih kecil dari F tabel dengan *p-value* $> 0,05$, sehingga H_0 diterima dan pengaruhnya terhadap kekerasan dinyatakan tidak signifikan pada tingkat kepercayaan 95%. Nilai F tabel sebesar 5,14 diperoleh berdasarkan jumlah sembilan spesimen pengujian, dengan derajat bebas perlakuan (df_1) = 2 dan derajat bebas galat (df_2) = 6, yang dihitung dari total spesimen dikurangi jumlah faktor dan satuan galat. Hasil ini menegaskan bahwa parameter yang berkaitan langsung dengan input panas dan durasi proses, yaitu *holding time* dan temperatur media air, lebih dominan dalam mengontrol pembentukan mikrostruktur dan peningkatan kekerasan dibandingkan kecepatan putar *tool*, serta konsisten dengan hasil ANOVA dan pengamatan mikrostruktur

E. Pembahasan Hipotesis

Berdasarkan hasil uji F pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$ sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 3.3**, parameter kecepatan putar *tool* (N) memiliki nilai F hitung sebesar 9,58, yang lebih kecil dibandingkan F tabel 5,14, serta nilai *p-value* sebesar 0,095 ($> 0,05$). Oleh karena itu, hipotesis nol (H_0) diterima dan parameter kecepatan putar *tool* dinyatakan tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap kekerasan sambungan UFSSW aluminium AA1100 dalam rentang parameter yang digunakan. Sebaliknya, parameter temperatur media air (WT) menunjukkan nilai F hitung sebesar 22,28, yang lebih besar dari F tabel 5,14, dengan *p-value* 0,043 ($< 0,05$), sehingga hipotesis nol (H_0) ditolak. Demikian pula, parameter *holding time* (HT) memiliki nilai F hitung sebesar 25,20, yang lebih besar dari F tabel 5,14, serta *p-value* 0,038 ($< 0,05$), sehingga hipotesis nol (H_0) juga ditolak. Penolakan H_0 pada parameter WT dan HT menunjukkan bahwa kedua parameter tersebut berperan dominan dalam mengendalikan input panas dan durasi proses, yang selanjutnya memengaruhi pembentukan mikrostruktur dan peningkatan kekerasan sambungan, khususnya pada zona Weld Nugget. Hasil ini konsisten dengan analisis ANOVA dan pengamatan mikrostruktur yang menunjukkan bahwa parameter termal dan waktu proses merupakan faktor utama dalam mengontrol kekerasan dan mikrostruktur sambungan UFSSW aluminium AA1100.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) terhadap kekerasan dan mikrostruktur sambungan aluminium AA1100, dapat disimpulkan bahwa variasi parameter proses memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik sambungan. Hasil pengujian kekerasan *Brinell* menunjukkan adanya perbedaan nilai kekerasan antara sisi depan dan sisi belakang sambungan, dengan nilai kekerasan tertinggi umumnya berada pada daerah yang dekat dengan *Weld Nugget*. Analisis statistik menggunakan metode *Taguchi* dan *General Linear Model* (ANOVA) membuktikan bahwa *holding time* dan temperatur media air berpengaruh signifikan terhadap kekerasan sambungan, sedangkan kecepatan putar *Tool* tidak menunjukkan pengaruh signifikan dalam rentang parameter yang digunakan.

Proses UFSSW juga menghasilkan pembagian zona mikrostruktur yang jelas, yaitu *Base Metal* (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), *Thermo-Mechanically Affected Zone* (TMAZ), dan *Weld Nugget* (WN). Penggunaan media air sebagai pendingin berperan dalam menekan pertumbuhan butir dan menghasilkan mikrostruktur yang lebih padat dan homogen, terutama pada zona *Weld Nugget*. Mikrostruktur tersebut berkorelasi langsung dengan peningkatan nilai kekerasan sambungan, sehingga dapat disimpulkan bahwa parameter termal dan waktu proses merupakan faktor utama dalam mengendalikan pembentukan mikrostruktur dan kekerasan sambungan UFSSW aluminium AA1100.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua atas doa, dukungan, dan motivasi yang mereka berikan selama penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat penting, serta kepada laboratorium tempat penelitian dilakukan atas fasilitas dan bantuan yang mereka berikan selama proses pengujian dan pengambilan data. Saya berharap semua bantuan yang diberikan mendapatkan hasil terbaik.

REFERENSI

- [1] D. Fadhillah, H. Widiatoro, and K. Kunci, "Pengaruh Inovasi Alat Bantu pada Efisiensi dan Kualitas Pengelasan Sambungan Pipa Longitudinal dengan GMAW," pp. 24–25, 2024.
- [2] X. Li, Z. Zhang, Y. Peng, and D. Yan, "Microstructure and mechanical properties of underwater friction stir welding of CNT / Al-Cu-Mg composites," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 18, pp. 405–415, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.02.089.
- [3] A. Zayadi and E. S. T., "Pengaruh Waktu Tempering terhadap Karakter Baja s45c Pasca Quenching pada 950 o c dan Tempering 500 o c," pp. 34–65.
- [4] B. T. Pengelasan, U. Friction, and S. Welding, *Teknologi Pengelasan Underwater Friction Stir Welding : Teori , Praktik , dan Aplikasi pada Material Aluminium Alloy*.
- [5] A. Rahmatika, S. Ibrahim, M. Hersaputri, E. Aprilia, J. Teknologi, and I. Teknologi, "STUDI PENGARUH VARIASI KUAT ARUS TERHADAP SIFAT MEKANIK HASIL PENGELASAN GTAW ALUMINIUM 1050 DENGAN FILLER ER 4043," pp. 47–54.
- [6] A. Vol, P. Semarang, A. Manova, L. Root, G. L. Model, and O. Anova, "Multivariate Analysis of Variance (MANOVA)," vol. 9, no. 1, pp. 37–53, 2018.
- [7] A. M. Kurniawan *et al.*, "PROSES UNDERWATER FRICTION WELDING UNTUK DISSIMILAR METAL ANTARA AISI 1045 DENGAN STAINLESS STEEL 304," vol. 11, no. 3, pp. 163–168, 2023.
- [8] A. K. Jassim and R. K. Al-subar, "Studying the Possibility to Weld AA1100 Aluminum Alloy by Friction Stir Spot Welding," vol. 11, no. 9, pp. 645–651, 2017.
- [9] P. Penelitian, T. Minyak, and B. Lemigas, "(The Factor that Affect the Precision and Accuracy of Test Result Data within Determine the Laboratory Compentency Level)," pp. 49–63, 2017.
- [10] M. Arizal and P. 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]," pp. 1–13.
- [11] R. Adira, "Pengaruh kecepatan penarikan dan pelumasan terhadap kualitas permukaan dan mikrostruktur pada proses penarikan aluminium 6061," 2024.
- [12] N. Subarkah, *PENGARUH FORGING PRESSURE DAN KECEPATAN PUTARAN TERHADAP SIFAT MEKANIK PADA SAMBUNGAN DISSIMILAR METAL Al-Cu DENGAN METODE FRICTION WELDING UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA CILEGON - BANTEN PUTARAN TERHADAP SIFAT*

- MEKANIK PADA SAMBUNGAN DISSIMILAR METAL Al-Cu DENGAN METODE FRICTION.* 2024.
- [13] V. Saumitra, Y. Singh, and S. K. Ekghara, "Materials Science : An Indian Journal Review on Underwater Friction Stir Welding of Aluminum Alloys," vol. 19, no. 9, pp. 1–31, 2022, doi: 10.37532/0974-7486.22.19.001.
- [14] S. Yasinta, T. N. Wibowo, R. Dwi, and W. Saputro, "Pengaruh Variasi Elektroda dan Kuat Arus Terhadap sifat Mekanik dan Struktur Mikro Sambungan Las SMAW Baja ST 60," vol. 5, no. 2, pp. 21–29, 2025.
- [15] M. I. P and M. Darsin, "SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO ALUMINIUM AA1100 HASIL PENGELASAN FRICTION STIR WELDING DENGAN VARIASI FEED RATE," vol. 0.
- [16] R. Firdaus and A. Ahfas, "STUDY OF UNDERWATER FRICTION STIR WELDING PROCESS PARAMETERS ON AA6005-T6 MATERIAL FOR MARINE INDUSTRY AND UNDERWATER STRUCTURE," vol. 16, no. 2, pp. 721–733, 2025, doi: 10.21776/jrm.v16i2.1922.
- [17] Mulyadi, S. T., & Iswanto, I. (2020). Teknologi Pengelasan.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.