

Effect of Underwater Friction Stir Spot Welding Process Parameters on the Shear Strength and Brinell Hardness of AA1100 Alloy Joints **[Pengaruh Parameter Proses Underwater Friction Stir Spot Welding terhadap Kekuatan Geser dan Kekerasan Brinell Sambungan Paduan AA1100]**

Mochamad Rhobbiatul Isro¹⁾, 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. *This study aims to analyze the effect of Underwater Friction Stir Spot Welding (UFSSW) process parameters on the shear strength and Brinell hardness of AA1100 aluminum alloy joints. The experimental method was conducted using a Taguchi L9 (3³) design, with variations in tool rotational speed (1000 rpm, 1100 rpm, 1200 rpm), water temperature (8°C, 29°C, and 60°C), and dwell time (4 s, 7 s, and 10 s). The analyzed responses included shear strength and Brinell hardness, which were statistically evaluated using the Taguchi method and Analysis of Variance (ANOVA). The results of the General Linear Model (GLM) ANOVA analysis showed that the maximum shear strength of 22.95 MPa was obtained at a water temperature of 60°C, with a contribution value of 52.21%, while the base metal shear strength was 55.05 MPa, indicating a significant effect on shear strength. Meanwhile, the Brinell hardness value of 53.5 HB was achieved at a tool rotational speed of 1200 rpm with a contribution of 16.50%, a water temperature of 60°C with a contribution of 38.38%, and a dwell time of 7 s with a contribution of 43.40%. The joint hardness was relatively close to that of the base metal (53.6 HB), indicating a significant effect on Brinell hardness.*

Keywords - Aluminium; Taguchi; ANOVA; General Linear Model; Lap Joints

Abstrak. *Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter proses Underwater Friction Stir Spot Welding (UFSSW) terhadap kekuatan geser dan kekerasan brinell sambungan paduan aluminium AA1100. Metode eksperimen dilakukan dengan rancangan Taguchi L9 (3³) menggunakan variasi kecepatan putar tool (1000 rpm, 1100 rpm, 1200 rpm), suhu air (8°C, 29°C, 60 °C), dan waktu penahanan (4 detik, 7 detik, 10 detik). Respon yang dianalisis meliputi kekuatan geser dan kekerasan brinell, kemudian dievaluasi secara statistik menggunakan metode Taguchi dan analisis varians (ANOVA). Hasil penelitian pada analisis General Linear Model (GLM) ANOVA menunjukkan bahwa kekuatan geser maksimum sebesar 22,95 MPa diperoleh pada parameter suhu air 60 °C dengan nilai kontribusi sebesar 52,21%, sedangkan base metal memiliki kekuatan geser 55,05 MPa, yang menunjukkan berpengaruh signifikan terhadap kekuatan geser. Sedangkan nilai kekerasan brinell sebesar 53,5 HB diperoleh pada parameter kecepatan putar 1200 dengan nilai kontribusi sebesar 16,50%, suhu air 60 °C dengan nilai kontribusi sebesar 38,38% dan waktu penahanan 7 detik dengan nilai kontribusi sebesar 43,40%, sambungan relatif mendekati base metal sebesar 53,6 HB, yang menunjukkan berpengaruh signifikan terhadap kekerasan brinell.*

Kata Kunci - Aluminium; Taguchi; Model Linier Umum; ANOVA; Sambungan Tumpang Tindih

I. PENDAHULUAN

Perkembangan dalam teknologi produksi telah menciptakan permintaan untuk teknik penyambungan logam yang dapat menghasilkan sambungan berkualitas tinggi dengan penggunaan energi yang efisien dan dampak lingkungan yang rendah, terutama pada material yang sensitif terhadap panas seperti paduan aluminium[1]. Proses pengelasan tradisional yang berbasis peleburan sering kali menimbulkan cacat pada sambungan las, penurunan karakteristik mekanik, serta distorsi akibat dari penginputan panas yang berlebihan[2]. Oleh karena itu, metode pengelasan dalam keadaan padat semakin banyak diupayakan sebagai solusi mengatasi isu-isu ini.

Salah satu teknik pengelasan dalam kondisi padat yang telah banyak diteliti adalah *Friction Stir Spot Welding* (FSW), yang menggunakan panas dari gesekan dan deformasi plastis tanpa mencairkan bahan[3]. Metode ini memiliki kelebihan dalam menghasilkan sambungan dengan kualitas metalurgi yang tinggi, struktur mikro yang lebih halus dan merata, serta sangat sedikit cacat pengelasan[4]. Selain itu, FSW tidak memerlukan material tambahan atau gas pelindung, sehingga lebih efisien dan ramah lingkungan[5]. Kelebihan ini membuat FSW banyak diterapkan di industri otomotif, penerbangan, dan manufaktur yang berbasis aluminium[6].

Pengembangan selanjutnya dari teknik FSW adalah *Friction Stir Spot Welding* (FSSW), yang merupakan metode penyambungan titik tanpa pergerakan translasi dari alat, yang dirancang sebagai alternatif untuk *Resistance Spot*

Welding (RSW), terutama di sektor otomotif dan industri ringan[7]. Dibandingkan dengan RSW, FSSW memiliki keunggulan berupa konsumsi energi yang lebih rendah, tidak memerlukan arus listrik tinggi, serta tidak menggunakan elektroda maupun bahan pengisi[8]. Sebagai proses pengelasan keadaan padat, FSSW mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas metalurgi dan sifat mekanik yang lebih baik[9]. Namun demikian, FSSW konvensional masih menghadapi permasalahan pengendalian temperatur akibat akumulasi panas selama proses pengelasan, yang dapat menyebabkan pertumbuhan butir berlebihan, pelunakan pada daerah terpengaruh panas (*heat affected zone*), serta ketidakhomogenan sifat mekanik, terutama pada material aluminium yang sensitif terhadap perubahan suhu[10].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dikembangkan metode *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW), yaitu proses FSSW yang dilakukan di dalam media air sebagai pendingin eksternal[11]. Keberadaan media air berfungsi menyerap panas berlebih yang dihasilkan selama proses pengelasan, sehingga mampu menurunkan temperatur puncak dan meningkatkan laju pendinginan[12]. Kondisi ini memungkinkan pengendalian pertumbuhan butir mikrostruktur, mengurangi pelunakan pada daerah terpengaruh panas, serta meningkatkan homogenitas sifat mekanik antara zona sambungan dan logam induk[13]. Dengan pengendalian temperatur yang lebih baik, UFSSW berpotensi menghasilkan sambungan dengan kualitas yang lebih konsisten serta kekuatan mekanik dan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan FSSW konvensional, khususnya pada paduan aluminium AA1100[14].

Paduan aluminium AA1100 merupakan aluminium murni komersial yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena memiliki ketahanan korosi yang baik, konduktivitas termal dan listrik yang tinggi, serta kemudahan dalam proses pembentukan dan fabrikasi[15]. Namun demikian, AA1100 memiliki keterbatasan berupa kekuatan mekanik yang relatif rendah, sehingga kualitas sambungan las menjadi faktor kritis dalam menentukan performa dan keandalan komponen, terutama ketika menerima beban geser[16]. Oleh karena itu, pemilihan metode pengelasan yang tepat serta pengendalian parameter proses, seperti kecepatan putar, waktu penekanan, dan suhu temperatur, sangat diperlukan untuk menghasilkan sambungan dengan sifat mekanik yang optimal[17].

Pada penelitian (Saban et al., 2024) telah dilakukan eksperimen mengenai parameter proses FSSW seperti kecepatan putar *tool*, bentuk *pin*, diameter *shoulder*, serta kondisi termal selama proses pengelasan sangat mempengaruhi sifat mekanik sambungan aluminium. Studi ini menyatakan bahwa peningkatan panas input selama proses FSSW dapat meningkatkan plastisasi material, memperbaiki ikatan antar material, serta meningkatkan kekuatan sambungan[18]. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada kekuatan tarik, sementara kajian terhadap kekuatan geser dan kekerasan *brinell*, khususnya pada proses *Underwater Friction Stir Spot Welding*, masih terbatas.

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun pengaruh variasi tool dan pemanas terhadap hasil pengelasan FSSW aluminium AA1100 telah diteliti, pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* terhadap kekuatan geser dan kekerasan *brinell* sambungan AA1100 belum banyak dikaji secara mendalam. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi celah penelitian (*research gap*) tersebut, yaitu kurangnya kajian eksperimental yang komprehensif mengenai pengaruh parameter proses UFSSW terhadap kekuatan geser dan kekerasan *brinell* sambungan paduan aluminium AA1100. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* terhadap kekuatan geser sambungan paduan AA1100, dan untuk mengetahui pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* terhadap kekerasan *brinell* sambungan paduan AA1100.

II. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Metode eksperimen digunakan karena penelitian dilakukan dengan memberikan perlakuan langsung berupa variasi parameter proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) pada sambungan paduan aluminium AA1100, kemudian diamati pengaruhnya terhadap respon mekanik yang dihasilkan. Respon yang dianalisis meliputi kekuatan geser sambungan dan kekerasan *brinell*. Pendekatan kuantitatif diterapkan karena data yang diperoleh berupa nilai numerik hasil pengujian mekanik, yang selanjutnya dianalisis menggunakan metode statistik *Design of Experiment* (DoE) *Taguchi* dan *General Linear Model Analysis of Variance* (ANOVA) untuk mengetahui signifikansi pengaruh parameter proses UFSSW.

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan aluminium AA1100 sebagai material induk pada proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW). Dari sisi ketahanan korosi, aluminium AA1100 memiliki kemampuan yang baik karena terbentuknya lapisan oksida alami pada permukaannya. Lapisan ini berfungsi sebagai pelindung terhadap lingkungan luar, termasuk lingkungan berair, sehingga material tetap stabil saat proses UFSSW dilakukan di dalam media air. Komposisi kimia aluminium AA1100 ditunjukkan pada Tabel 1, yang memperlihatkan bahwa unsur aluminium (Al) merupakan unsur dominan dengan persentase sebesar 99,3%. Kandungan aluminium

yang sangat tinggi inilah yang menyebabkan AA1100 dikategorikan sebagai aluminium murni komersial. Selain aluminium, terdapat sejumlah unsur paduan dalam jumlah yang sangat kecil, seperti silikon (Si), besi (Fe), mangan (Mn), kromium (Cr), tembaga (Cu), magnesium (Mg), dan seng (Zn).

Tabel 1. Komposisi Kimia Aluminium AA1100

Element	Composition (wt %)
Al	99.3
Zn	0.006
Mn	0.016
Si	0.138
Cu	0.009
Cr	0.03
Fe	0.182
Mg	0.007

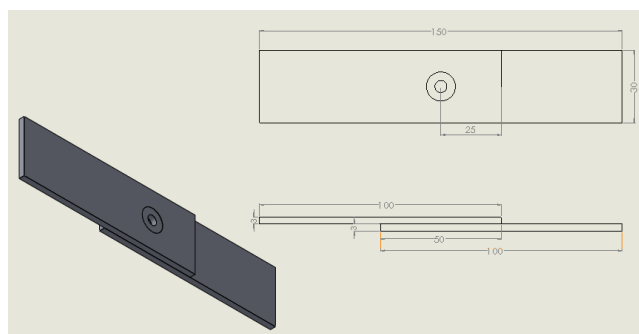
Material ST-90 merupakan baja karbon menengah yang umum digunakan sebagai material *Underwater Friction Stir Spot Welding* yang memiliki kombinasi kekuatan, kekerasan, dan ketahanan aus yang baik, sehingga mampu menahan beban tekan dan gesekan tinggi selama proses pengelasan berlangsung. Komposisi kimia material ST-90, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Terdiri dari unsur karbon (C) sebesar 0,45–0,60% yang berperan meningkatkan kekerasan dan kekuatan *Underwater Friction Stir Spot Welding*, mangan (Mn) sebesar 0,60–0,90% yang berfungsi meningkatkan ketahanan aus dan kekuatan tarik, serta silikon (Si) sebesar 0,15–0,35% yang berperan sebagai deoksidator dan pendukung kekuatan material. Kandungan fosfor (P) dan sulfur (S) dibatasi hingga maksimum 0,035% untuk mencegah kerapuhan, sedangkan besi (Fe) sebagai unsur utama membentuk struktur dasar baja ST-90. Dengan komposisi tersebut, material ST-90 memiliki karakteristik yang sesuai untuk digunakan sebagai *Underwater Friction Stir Spot Welding UFSSW* karena mampu menghasilkan panas gesek yang cukup tanpa mengalami keausan atau deformasi berlebihan, sehingga mendukung terbentuknya sambungan dengan kekuatan geser dan kekerasan *brinell* yang baik.

Tabel 2. Komposisi Kimia Material ST-90

Unsur	Kisaran (% berat)
C	0.45 – 0.60
Mn	0.60 – 0.90
Si	0.15 – 0.35
P	Maks 0.035
S	Maks 0.035
Fe	Sisa

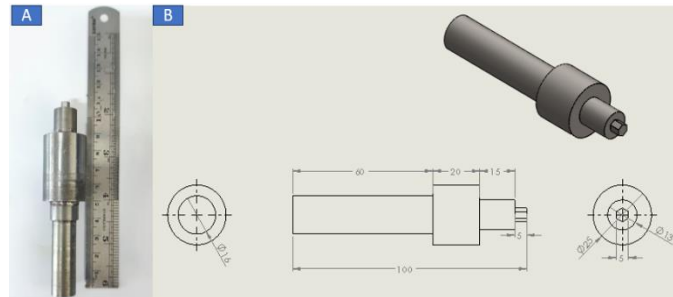
Peralatan yang digunakan meliputi mesin *frais* sebagai mesin utama UFSSW, mesin CNC dan mesin bubut untuk pembuatan alat UFSSW yang terbuat dari baja ST-90 dengan desain *pin* heksagonal dan spesimen uji kekuatan geser, kamera termal dan termokopel tipe K untuk memantau suhu selama proses pengelasan, serta mesin uji tarik/geser dan mesin uji kekerasan *brinell* untuk menguji sifat mekanik sambungan.

Desain material penelitian dibuat dari paduan aluminium AA1100 dalam bentuk pelat sambungan tumpang tindih. Titik pengelasan ditempatkan tepat di tengah area tumpang tindih untuk memastikan distribusi panas yang merata dan beban geser selama pengujian, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. dibawah ini.



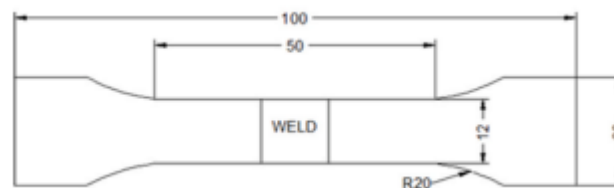
Gambar 1. Desain Material Aluminium AA1100

Desain Tool ST-90 yang digunakan dalam penelitian ini dirancang secara presisi untuk menunjang proses *Underwater Friction Stir Spot Welding (UFSSW)*. Pin berbentuk *hexagonal* ini bertujuan untuk meningkatkan efektivitas pengadukan mekanis, membantu pemecahan lapisan oksida pada permukaan logam, dan memastikan terciptanya ikatan yang homogen pada sambungan las. Berikut desain dari pembuatan ST-90 yang tertera pada Gambar 2.



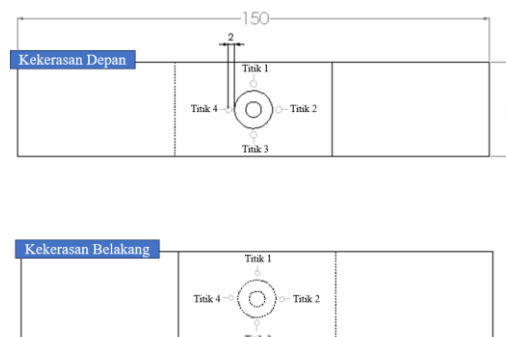
Gambar 2. (A) Tool (B)Desain Tool ST-90

Spesimen uji kekuatan geser dibuat dari paduan aluminium AA1100 dengan bentuk pelat tumpang (*lap joint*) yang umum digunakan pada pengujian *Underwater Friction Stir Spot Welding* menggunakan standart ASTM E8/E8M. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan ikatan sambungan titik yang terbentuk akibat pengaruh parameter proses UFSSW. Oleh karena itu, spesimen dirancang secara khusus agar pembebanan yang diberikan selama pengujian menghasilkan kondisi tegangan geser dominan pada daerah sambungan, sehingga nilai gaya maksimum yang diperoleh dapat merepresentasikan kekuatan geser sambungan secara langsung. Berikut Gambar 3. desain dari spesimen kekuatan geser.



Gambar 3. Spesimen Uji Kekuatan Geser

Spesimen kekerasan *brinell* digunakan untuk mengevaluasi perubahan sifat kekerasan permukaan material akibat proses *Underwater Friction Stir Spot Welding (UFSSW)* pada paduan aluminium AA1100. Penempatan titik uji dilakukan dengan jarak tertentu untuk menghindari pengaruh antar lekukan hasil indentasi. Nilai kekerasan *brinell* yang diperoleh dari masing-masing titik digunakan untuk mengevaluasi pengaruh parameter proses UFSSW terhadap perubahan sifat mekanik sambungan paduan aluminium AA1100, serta untuk mengkaji keterkaitan antara distribusi kekerasan dan kualitas sambungan yang dihasilkan. Berikut Gambar 4. desain dari spesimen kekerasan *brinell*.



Gambar 4. Spesimen Uji Kekerasan *Brinell*

Pelaksanaan proses *Underwater Friction Stir Spot Welding (UFSSW)* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan rotasi *Underwater Friction Stir Spot Welding*, suhu media air, dan waktu penahanan terhadap kualitas

sambungan las. Metode *Taguchi* digunakan untuk meminimalkan jumlah eksperimen dengan tetap mempertahankan representasi faktor secara statistik. Dalam penelitian ini digunakan tiga level kecepatan rotasi *Underwater Friction Stir Spot Welding* (1000 rpm, 1100 rpm, dan 1200 rpm), tiga level suhu media air (8°C, 29°C, dan 60°C), serta tiga level waktu penahanan (4 detik, 7 detik, dan 10 detik). Berdasarkan kombinasi faktor tersebut, digunakan *orthogonal array* L9 (3³) yang menghasilkan sembilan percobaan seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

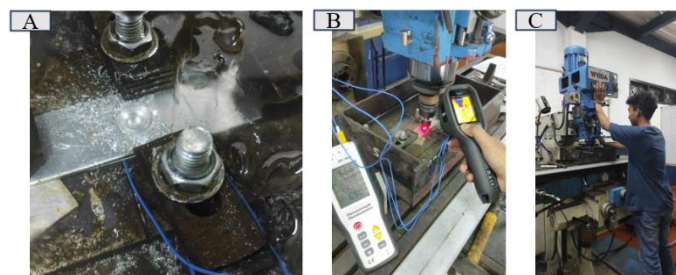
Tabel 3. Desain eksperimen *Columns of L9* (3³)

No	Kecepatan Rotasi (RPM)	Suhu Air (°C)	Waktu Penahanan (detik)
A	1000	8	4
B	1000	29	7
C	1000	60	10
D	1100	8	7
E	1100	29	10
F	1100	60	4
G	1200	8	10
H	1200	29	4
I	1200	60	7

Prosedur penelitian ini disusun untuk memberikan gambaran yang sistematis mengenai tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian, mulai dari proses pembuatan sambungan hingga pengujian sifat mekanik material. Setiap tahap dilakukan secara terkontrol dan berurutan guna memperoleh data yang akurat serta dapat dipertanggungjawabkan. Adapun prosedur penelitian dalam studi ini meliputi proses pengelasan gesek pada benda uji, proses pengujian kekuatan geser, dan proses pengujian kekerasan *brinell*.

Proses pengelasan benda uji menggunakan metode *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) dilakukan melalui tahapan, serta terlihat pada Gambar 5. sebagai berikut:

1. Plat aluminium AA1100 dipotong sesuai dengan dimensi spesimen yang telah ditentukan.
2. Spesimen disusun dalam bentuk sambungan *lap joint* dan dijepit dengan kuat pada meja mesin *milling*.
3. Spesimen ditempatkan di dalam bak besi berisi media air tawar dengan variasi temperatur 8°C, 29°C, dan 60°C sesuai dengan parameter penelitian.
4. Pada *spindle* mesin *milling* dan diatur sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.
5. *Tool* diputar pada kecepatan putar (rpm) yang telah ditetapkan, kemudian ditekan hingga kedalaman tertentu dan ditahan selama 4 detik, 7 detik, dan 10 detik sesuai variasi waktu penahanan (*dwell time*).
6. Selama proses pengelasan berlangsung, temperatur daerah sambungan dipantau menggunakan thermal camera dan thermocouple tipe K.
7. Setelah proses pengelasan selesai, *Underwater Friction Stir Spot Welding* diangkat secara perlahan dan spesimen dibiarkan sejenak di dalam media air untuk pendinginan alami.

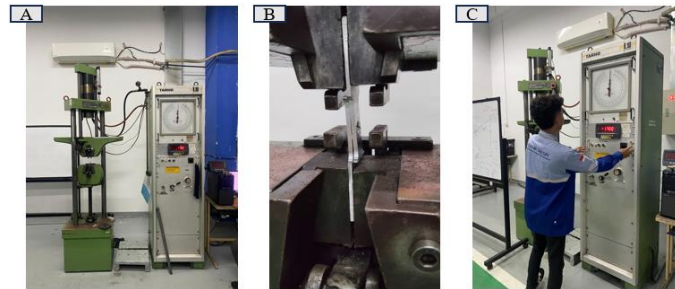


Gambar 5. A) Proses Pemasangan Kabel Temperatur, B) Temperatur Pengelasan, C) Proses UFSSW

Proses pengujian kekuatan geser pada sambungan hasil *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) aluminium AA1100 dilakukan melalui tahapan, serta Gambar 6. proses uji sebagai berikut:

1. Persiapan spesimen sambungan aluminium AA1100 hasil proses UFSSW dipersiapkan sesuai dengan dimensi dan bentuk yang telah ditentukan. Permukaan spesimen dibersihkan dari kotoran, oksida, dan sisa proses pengelasan agar tidak memengaruhi hasil pengujian.
2. Pemasangan spesimen pada alat uji tarik universal (*Universal Testing Machine/UTM*) menggunakan alat bantu (*fixture*) khusus uji geser. Pemasangan dilakukan secara simetris dan sejajar untuk memastikan gaya yang bekerja menghasilkan kondisi geser pada daerah sambungan.

3. Pengaturan parameter pengujian sesuai dengan parameter yang ditetapkan, seperti kecepatan pembebanan dan kapasitas beban. Pengaturan ini bertujuan untuk memastikan pembebanan berlangsung secara bertahap dan terkendali.
4. Pelaksanaan pengujian geser dilakukan dengan memberikan beban penarik secara bertahap hingga sambungan mengalami kegagalan. Selama pengujian, mesin uji mencatat besarnya gaya yang bekerja pada spesimen secara kontinu.
5. Pencatatan beban maksimum tepat sebelum sambungan mengalami kegagalan dicatat sebagai gaya geser maksimum. Nilai ini digunakan sebagai dasar dalam penentuan kekuatan geser sambungan.
6. Pengamatan pola kegagalan dilakukan pengamatan visual terhadap spesimen untuk mengetahui jenis dan lokasi kegagalan sambungan. Hasil pengamatan ini digunakan sebagai data pendukung dalam analisis hasil pengujian.



Gambar 6. A) Alat Uji Kekuatan Geser, B) Pemasangan Sepsimen, C) Proses Uji Kekuatan Geser

Prosedur uji kekerasan *brinell* pada sambungan hasil *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) aluminium AA1100 dilakukan melalui tahapan serta Gambar 7. proses uji sebagai berikut:

1. Spesimen hasil pengelasan dipotong melintang pada daerah sambungan untuk mendapatkan bidang uji yang mewakili zona *base metal* (BM), *heat affected zone* (HAZ), *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ), dan *stir zone* (SZ).
2. Permukaan spesimen diratakan dan dibersihkan dari kotoran serta oksida menggunakan amplas halus agar diperoleh permukaan uji yang rata dan bersih.
3. Spesimen ditempatkan pada meja mesin uji kekerasan *brinell*.
4. Bola indentor *brinell* dengan diameter 2,5 mm dipasang pada mesin uji.
5. Beban penekanan sebesar 613 N diberikan pada permukaan spesimen selama waktu penekanan yang telah ditentukan oleh standar pengujian.
6. Setelah beban dilepaskan, diameter jejak indentasi diukur menggunakan mikroskop pengukur pada mesin uji.
7. Nilai kekerasan *brinell* (HB) dihitung berdasarkan hasil pengukuran diameter indentasi.
8. Pengujian dilakukan pada beberapa titik pada masing-masing zona mikrostruktur untuk memperoleh distribusi nilai kekerasan sambungan.



Gambar 7. A) Luka Hasil Uji Kekerasan, B) Alat Uji Kekerasan, Proses Uji Kekerasan

Data hasil pengujian kekuatan geser dan kekerasan *brinell* dianalisis menggunakan metode *Taguchi* untuk mengetahui pengaruh setiap parameter proses terhadap nilai rata-rata respon. Selanjutnya, analisis statistik *General Linear Model Analysis of Variance* (ANOVA) digunakan untuk menentukan tingkat signifikansi pengaruh parameter proses UFSSW terhadap respon mekanik sambungan. Parameter proses dinyatakan berpengaruh signifikan apabila nilai *p-value* lebih kecil dari tingkat signifikansi 0,05. Hasil analisis ini digunakan sebagai dasar dalam menarik kesimpulan mengenai pengaruh parameter UFSSW terhadap kualitas sambungan paduan aluminium AA1100.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengelasan UFSSW

Hasil pengelasan *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) pada paduan aluminium AA1100 menunjukkan terbentuknya sambungan yang baik dengan adanya zona adukan di pusat titik las akibat interaksi rotasi *tool* dan deformasi plastis material. Proses pengelasan yang dilakukan di dalam media air berperan sebagai pendingin sehingga mampu menekan temperatur maksimum, mengurangi oksidasi permukaan, serta meminimalkan terjadinya cacat makro seperti retak dan porositas. Pendinginan yang lebih cepat juga berkontribusi terhadap pembentukan struktur sambungan yang lebih homogen, yang secara langsung memengaruhi peningkatan kualitas ikatan antar material dan mendukung pencapaian sifat mekanik sambungan yang lebih optimal. Terlihat pada Gambar 8. dibawah ini.

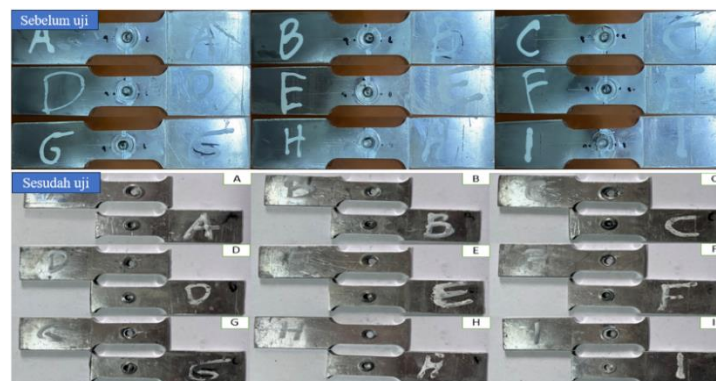


Gambar 8. Hasil Pengelasan UFSSW

B. Data Hasil Pengujian Kekuatan Geser

Berdasarkan Gambar 9, hasil uji geser menunjukkan perbedaan kualitas sambungan pada setiap spesimen akibat variasi parameter proses UFSSW. Spesimen A memiliki kekuatan geser rendah akibat pembangkitan panas dan aliran material yang belum optimal. Peningkatan kualitas mulai terlihat pada spesimen B melalui deformasi plastis sebelum patah. Pada spesimen C, kegagalan yang terpusat di area *nugget* mengindikasikan distribusi panas dan pencampuran material yang kurang merata akibat pendinginan yang cepat, sehingga kekuatan sambungan belum berkembang maksimal.

Spesimen D, E, dan G menunjukkan performa sambungan yang baik dengan deformasi bertahap dan merata sebelum patah, menandakan keseimbangan antara pembangkitan panas dan pendinginan serta terbentuknya area ikatan yang efektif. Sebaliknya, spesimen F mengalami penurunan kekuatan akibat pelunakan berlebih karena panas yang terlalu tinggi. Pada spesimen H, ikatan yang terbatas dan kegagalan dini menunjukkan panas dan waktu penahanan yang belum mencukupi, sedangkan spesimen I memperlihatkan karakteristik paling stabil dengan kemampuan menahan beban geser yang tinggi karena parameter proses mendekati kondisi optimum.

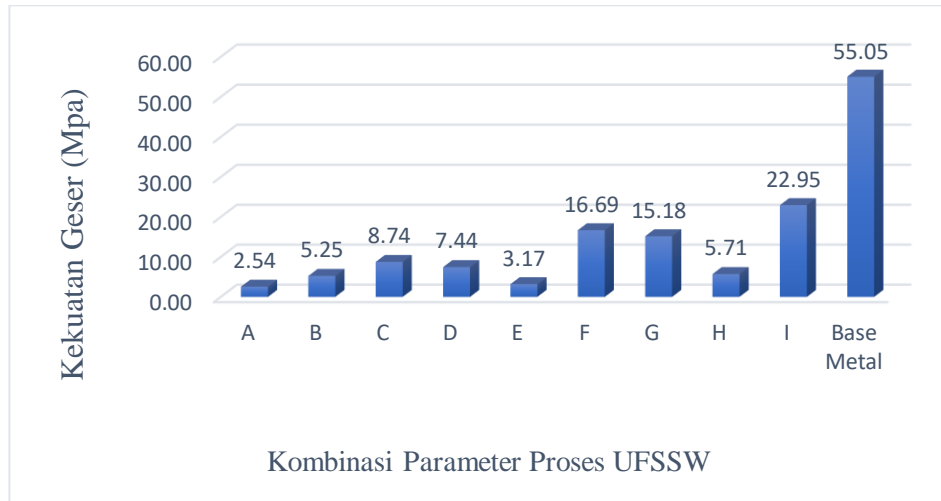


Gambar 9. Spesimen Hasil Uji Kekuatan Geser

Berdasarkan Gambar 10 yang menampilkan grafik rata-rata kekuatan geser hasil uji geser, terlihat bahwa nilai kekuatan geser sambungan *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) bervariasi signifikan pada setiap kombinasi parameter proses. Nilai terendah diperoleh pada spesimen A sebesar 2,54 MPa, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada spesimen I sebesar 22,95 MPa. Perbedaan ini menunjukkan bahwa variasi parameter proses berpengaruh langsung terhadap kualitas dan kemampuan sambungan dalam menahan beban geser.

Secara umum, kombinasi kecepatan putar yang lebih tinggi, suhu media air yang lebih hangat, serta *holding time* yang memadai cenderung menghasilkan kekuatan geser yang lebih besar. Hal ini mengindikasikan bahwa keseimbangan antara pembangkitan panas dan laju pendinginan sangat menentukan terbentuknya ikatan yang optimal. Peningkatan satu parameter saja tidak selalu memberikan hasil maksimal apabila tidak didukung oleh pengaturan parameter lainnya secara proporsional.

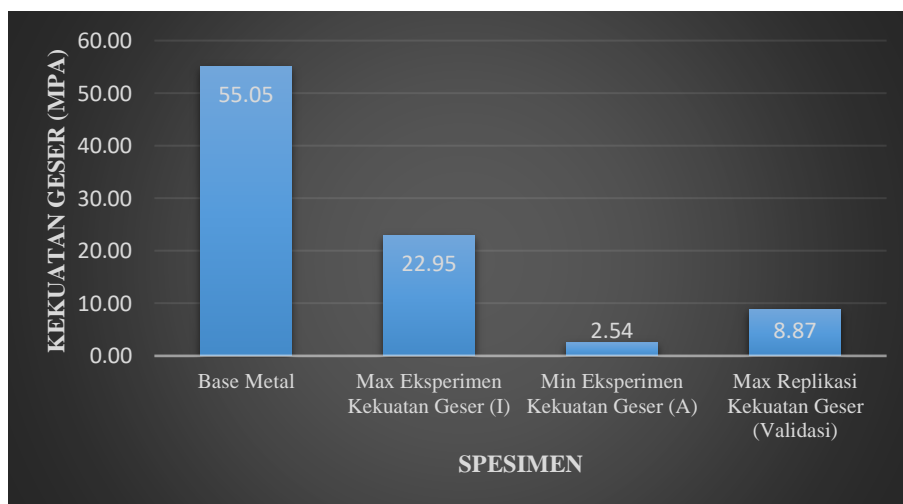
Sebagai pembandingan, material tanpa sambungan (*base metal*) memiliki rata-rata kekuatan geser sebesar 55,05 MPa, yang jauh lebih tinggi dibandingkan seluruh spesimen hasil UFSSW. Perbedaan ini menunjukkan bahwa keberadaan daerah sambungan masih menyebabkan penurunan kekuatan mekanik akibat perubahan struktur mikro serta konsentrasi tegangan pada area las.



Gambar 10. Hasil Uji Kekuatan Geser Eksperimen

Berdasarkan Gambar 11, hasil uji geser menunjukkan perbedaan nilai rata-rata kekuatan geser pada kondisi eksperimen maksimal, eksperimen minimal, dan replikasi maksimal. Nilai tertinggi diperoleh pada eksperimen maksimal (Spesimen I) sebesar 22,95 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada eksperimen minimal (Spesimen A) sebesar 2,54 MPa. Pada replikasi maksimal (validasi) diperoleh nilai 8,87 MPa, yang menunjukkan bahwa hasil pengulangan masih memberikan kekuatan yang cukup baik meskipun lebih rendah dari kondisi optimal.

Jika dibandingkan dengan *base metal* sebesar 55,05 MPa, kekuatan geser Spesimen I masih lebih rendah, yaitu sekitar 41,7% dari material induk. Perbedaan ini menunjukkan bahwa daerah sambungan masih mengalami penurunan kekuatan akibat perubahan struktur dan konsentrasi tegangan di area las. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa variasi parameter proses UFSSW berpengaruh signifikan terhadap kekuatan geser sambungan, namun kekuatan yang dihasilkan masih berada di bawah kekuatan material induk.

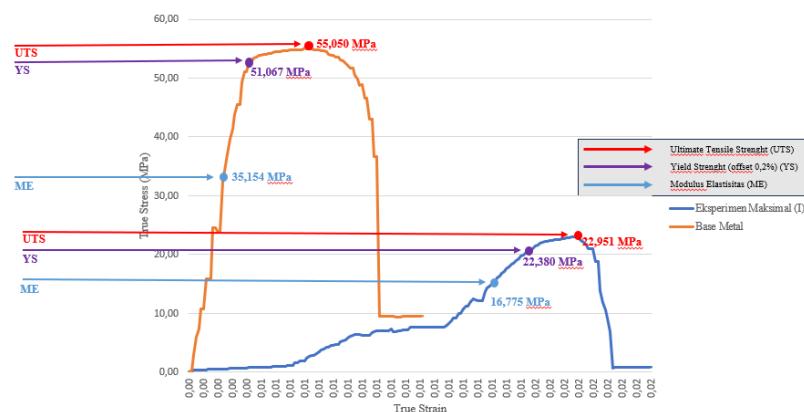


Gambar 11. Grafik Uji Kekuatan Geser Hasil Pengelasan UFSSW

Berdasarkan Gambar 12, hasil uji tarik menunjukkan bahwa *base metal* memiliki UTS sebesar 55,050 MPa, sedangkan eksperimen maksimal (Spesimen I) sebesar 22,951 MPa. Penurunan ini menunjukkan bahwa proses UFSSW menyebabkan degradasi kekuatan tarik akibat perubahan mikrostruktur pada *Stir Zone* (SZ) dan *Heat Affected Zone* (HAZ) meskipun dilakukan dalam media air. Nilai *yield strength* (*offset* 0,2%) juga menurun dari 51,067 MPa pada *base metal* sedangkan 22,331 MPa pada eksperimen maksimal (Spesimen I). Hal ini menandakan material lebih

cepat mengalami deformasi plastis akibat rekristalisasi dinamis dan pelunakan struktur selama proses pengelasan pada 1200 rpm dan waktu penahanan 7 detik.

Modulus elastisitas mengalami penurunan dari 35,154 MPa pada *base metal* sedangkan 16,775 MPa pada eksperimen maksimal (Spesimen I), yang menunjukkan berkurangnya kekakuan material akibat kombinasi panas, tekanan, dan pendinginan pada suhu air 60 °C. Secara umum, kurva tegangan–regangan memperlihatkan bahwa *base metal* lebih mampu mempertahankan tegangan sebelum patah, sedangkan spesimen UFSSW mengalami penurunan lebih cepat setelah mencapai tegangan maksimum. Dengan demikian, parameter proses pada kondisi ini masih menyebabkan penurunan sifat mekanik dibandingkan material induk dan memerlukan optimasi lebih lanjut.

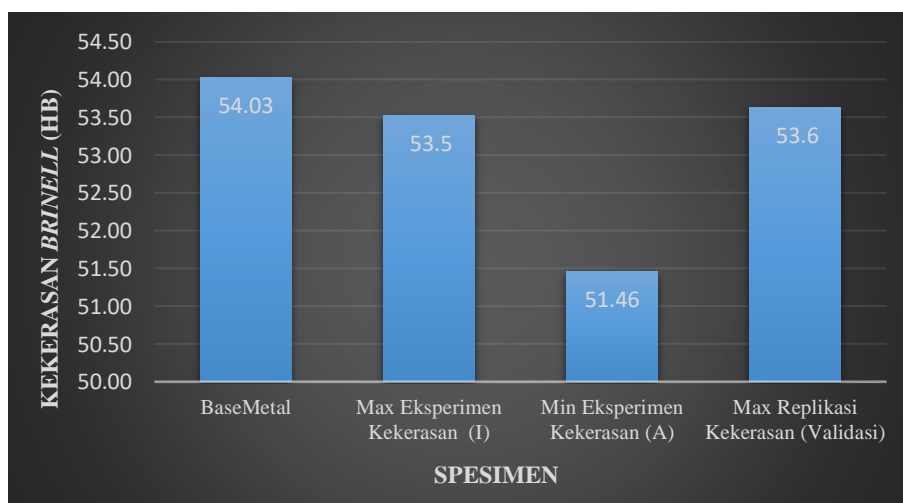


Gambar 12. Grafik Uji Kekuatan Geser Eksperimen Maksimal (I) dan *Base Metal*

C. Data Hasil Penelitian Pengujian Kekerasan *Brinell*

Berdasarkan Gambar 13, menunjukan hasil uji kekerasan *brinell*, *base metal* memiliki nilai kekerasan sebesar 54,03 HB. Pada kondisi eksperimen maksimal (Spesimen I) sebesar 53,5 HB, sedangkan pada eksperimen minimal (Spesimen A) sebesar 51,46 HB. Hasil replikasi maksimum (validasi) menunjukkan nilai 53,6 HB, yang mendekati nilai eksperimen maksimum. Apabila dibandingkan secara langsung, selisih kekerasan antara *base metal* dan Spesimen I relatif kecil, yaitu sekitar 0,53 HB atau kurang dari 1%. Hal ini menunjukkan bahwa parameter proses UFSSW pada kondisi maksimum tidak menyebabkan perubahan kekerasan yang signifikan terhadap material induk.

Pendinginan oleh media air mampu membatasi kenaikan temperatur berlebih sehingga pelunakan akibat rekristalisasi dan pertumbuhan butir dapat diminimalkan. Sebaliknya, penurunan kekerasan yang lebih besar pada spesimen eksperimen minimal (Spesimen A) menunjukkan bahwa kombinasi parameter yang kurang optimal dapat mempercepat terjadinya pelunakan material di daerah sambungan. Secara keseluruhan, hasil ini mengindikasikan bahwa pada kondisi parameter terbaik, proses UFSSW mampu mempertahankan kekerasan material mendekati nilai *base metal*, meskipun tetap terjadi perubahan mikrostruktur pada daerah las.



Gambar 13. Grafik Uji Kekerasan *Brinell* Hasil Pengelasan UFSSW

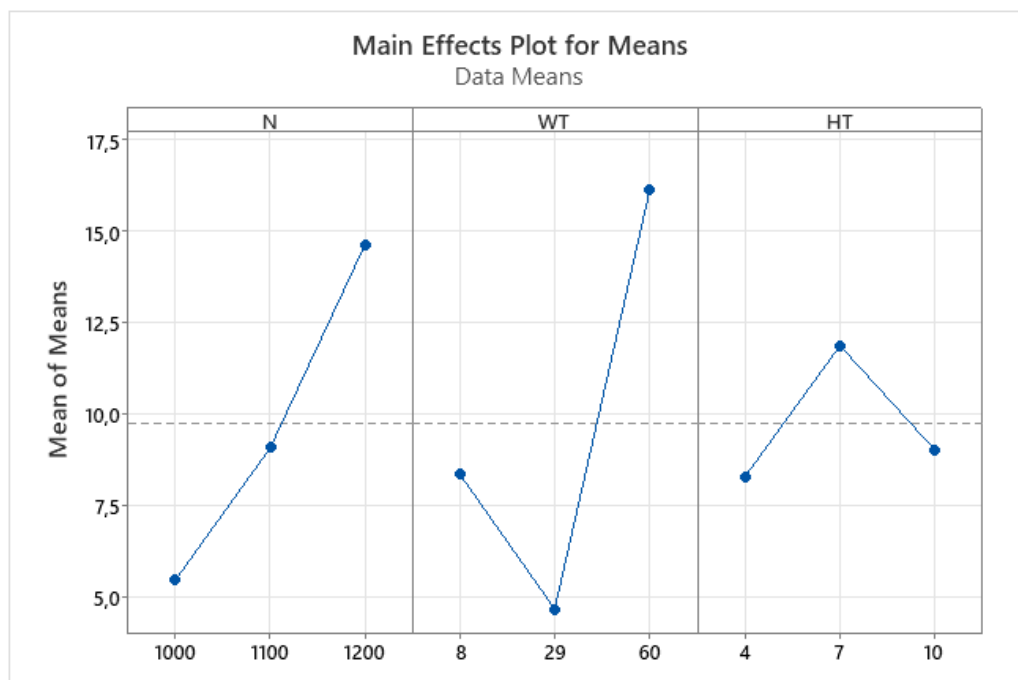
D. Pembahasan Hasil Uji Kekuatan Geser dan Hasil Kekerasan *Brinell*

Berdasarkan hasil pengujian, kondisi eksperimen maksimal (Spesimen I) dengan parameter kecepatan putar 1200 RPM, suhu air 60 °C, dan waktu penahanan 7 detik menghasilkan kekuatan geser tertinggi sebesar 22,95 MPa di antara seluruh sambungan UFSSW. Nilai kekerasan *brinell* rata-rata pada kondisi ini sebesar 53,5 HB. Kombinasi parameter tersebut mampu menghasilkan keseimbangan antara pembangkitan panas, deformasi plastis, dan pendinginan, sehingga mendukung terjadinya rekristalisasi dinamik dan pembentukan struktur butir yang lebih homogen pada *stir zone*. Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan kualitas ikatan dan kemampuan sambungan dalam menahan beban geser. Sebagai pembanding, *base metal* aluminium AA1100 memiliki kekuatan geser sebesar 55,05 MPa, jauh lebih tinggi dibandingkan seluruh spesimen hasil UFSSW, karena tidak mengalami pengaruh panas maupun perubahan mikrostruktur akibat proses pengelasan. Nilai kekerasan *brinell base metal* sebesar 54,03 HB, yang relatif mendekati spesimen eksperimen maksimal (Spesimen I). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kekerasan tidak mengalami perubahan signifikan, keberadaan daerah sambungan tetap menurunkan kekuatan geser akibat konsentrasi tegangan dan ketidakseragaman struktur pada area las.

Pada kondisi eksperimen minimal (Spesimen A) (1000 RPM, 8 °C, 4 detik), diperoleh kekuatan geser terendah sebesar 2,54 MPa dengan kekerasan rata-rata sekitar 51,46 HB. Rendahnya kekuatan geser menunjukkan bahwa ikatan yang terbentuk belum optimal akibat masukan panas yang tidak mencukupi dan pendinginan yang terlalu cepat, sehingga plastisasi dan aliran material terbatas. Sementara itu, replikasi maksimal menghasilkan kekuatan geser 8,87 MPa dengan kekerasan sekitar 53,6 HB. Perbedaan terhadap eksperimen maksimal (Spesimen I) utama mengindikasikan adanya variasi distribusi panas dan pembentukan *nugget* selama proses, meskipun parameter yang digunakan sama. Secara keseluruhan, peningkatan kekerasan akibat proses UFSSW tidak selalu sebanding dengan peningkatan kekuatan geser. Kekuatan geser lebih ditentukan oleh kualitas ikatan dan homogenitas struktur sambungan, yang sangat bergantung pada kestabilan dan kombinasi parameter proses. Kondisi eksperimen maksimal menunjukkan performa mekanik terbaik dibandingkan variasi lainnya.

E. Analisis Statistik Pengaruh Parameter Proses UFSSW

Berdasarkan Gambar 14 *Main Effect Plot for Means* metode *Taguchi*, *Water Temperature* (WT) merupakan parameter yang memberikan pengaruh paling besar terhadap nilai respon, yaitu 1200 RPM. Kecepatan putar *tool* (N) menunjukkan kecenderungan peningkatan respon seiring bertambahnya kecepatan putar, yaitu 60°C. Sedangkan *Holding Time* (HT) memiliki nilai optimum pada level menengah, yaitu 7 detik. Secara keseluruhan, pengaruh parameter terhadap respon berturut-turut adalah WT, N, dan HT, yang sejalan dengan hasil analisis ANOVA.



Gambar 14. Grafik *Main Effect Plot for Means*

Berdasarkan hasil analisis *General Linear Model* (GLM) ANOVA pada Tabel 4, parameter *Water Temperature* (WT) menunjukkan pengaruh paling dominan terhadap kekuatan geser sambungan *Underwater Friction Stir Spot*

Welding (UFSSW). Hal ini ditunjukkan oleh nilai kontribusi tertinggi sebesar 52,21% dan nilai *sum of squares* sebesar 203,64, yang mengindikasikan bahwa variasi suhu air merupakan faktor utama yang memengaruhi perubahan kekuatan geser.

Parameter kecepatan putar *tool* (N) memberikan kontribusi sebesar 32,37% dengan nilai SS 126,23, sehingga berperan cukup signifikan dalam memengaruhi kekuatan sambungan. Pengaruh ini berkaitan dengan besarnya panas gesekan dan tingkat plastisitas material selama proses pengelasan. Sementara itu, *Holding Time* (HT) memiliki kontribusi paling kecil, yaitu 5,48% dengan nilai SS 21,36, yang menunjukkan bahwa variasi waktu tahan dalam penelitian ini tidak berpengaruh besar terhadap kekuatan geser.

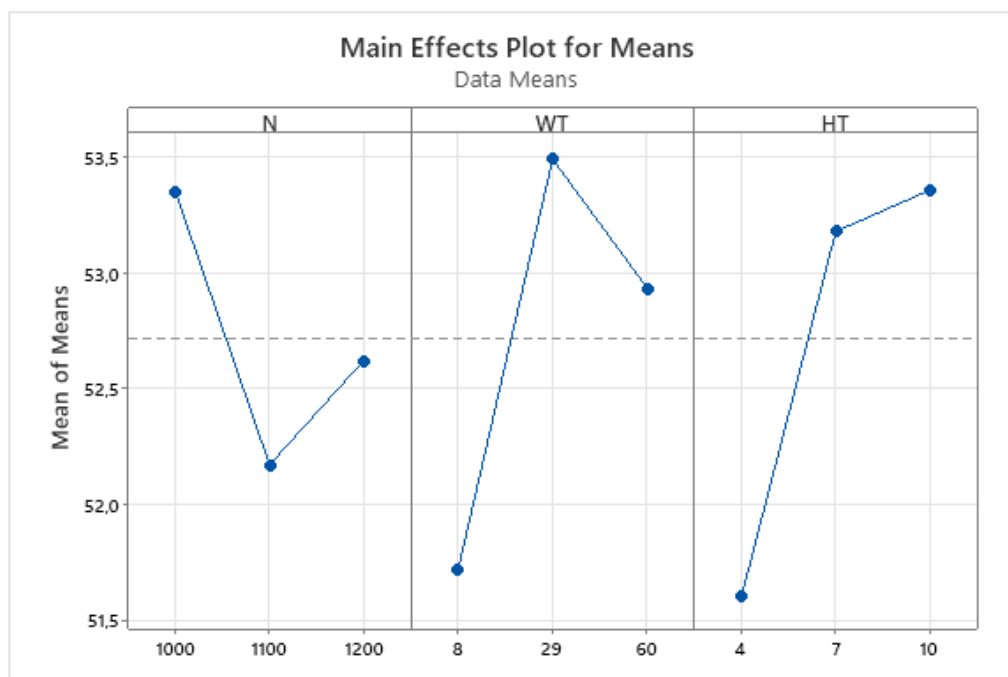
Nilai *error* sebesar 9,94% menandakan adanya pengaruh faktor lain di luar parameter yang diteliti, namun masih dalam batas yang dapat diterima sehingga model eksperimen dinilai cukup baik. Berdasarkan nilai *F-value*, WT memiliki pengaruh relatif paling besar, diikuti oleh N dan HT. Namun, seluruh parameter memiliki *P-value* > 0,05, sehingga pada tingkat kepercayaan 95% pengaruhnya belum signifikan secara statistik.

Secara keseluruhan, hasil ANOVA menunjukkan bahwa suhu air merupakan parameter paling berpengaruh terhadap kekuatan geser sambungan UFSSW, diikuti oleh kecepatan putar *tool*, sedangkan *holding time* memberikan pengaruh yang relatif kecil.

Tabel 4. *Analysis of Variance* Kekuatan Geser

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-value	P-Value
N	2	126,23	32,37%	126,23	63,12	3,26	0,235
WT	2	203,64	52,21%	203,64	101,82	5,25	0,160
HT	2	21,36	5,48%	21,36	10,68	0,55	0,645
Error	2	38,78	9,94%	38,78	19,39		
Total	8	390,02	100,00%				

Berdasarkan Gambar 15, *Main Effect Plot for Means* metode *Taguchi*, *Water Temperature* (WT) menunjukkan pengaruh paling dominan terhadap nilai rata-rata respon dengan kondisi optimum pada suhu 29 °C. *Holding Time* (HT) memberikan pengaruh cukup signifikan dengan kecenderungan peningkatan respon seiring bertambahnya waktu penahanan, yaitu 10 detik. Sementara itu, kecepatan putar *tool* (N) memiliki pengaruh relatif paling kecil dengan pola perubahan yang tidak linier, yaitu 1000 RPM. Secara keseluruhan, urutan tingkat pengaruh parameter terhadap respon adalah WT, HT, dan N, yang sejalan dengan hasil analisis ANOVA.



Gambar 15. *Main Effect Plot for Means*

Berdasarkan hasil analisis *General Linear Model* (GLM) ANOVA pada Tabel 5, parameter kecepatan putar *tool* (N) memiliki nilai kontribusi sebesar 16,50% dengan *P-value* 0,095. Nilai tersebut lebih besar dari 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa kecepatan putar tidak berpengaruh signifikan terhadap kekerasan *brinell* pada tingkat kepercayaan 95%. Meskipun demikian, nilai kontribusi tersebut menunjukkan bahwa kecepatan putar tetap memberikan pengaruh, namun tidak dominan dibandingkan parameter lainnya.

Parameter suhu air (*Water Temperature/WT*) menunjukkan kontribusi sebesar 38,38% dengan *P-value* 0,043, yang menandakan adanya pengaruh signifikan terhadap kekerasan *brinell*. Hal ini mengindikasikan bahwa suhu air berperan penting dalam mengendalikan laju pendinginan selama proses pengelasan bawah air, yang selanjutnya memengaruhi pembentukan struktur mikro dan nilai kekerasan material.

Sementara itu, *Holding Time* (HT) merupakan parameter dengan pengaruh paling dominan, ditunjukkan oleh nilai kontribusi tertinggi sebesar 43,40% dan *P-value* 0,038. Lamanya waktu penahanan memungkinkan distribusi panas dan proses plastisasi material berlangsung lebih optimal, sehingga memberikan perubahan struktur mikro yang signifikan dan berdampak langsung pada peningkatan kekerasan *brinell*.

Nilai *error* yang rendah, yaitu 1,72%, menunjukkan bahwa sebagian besar variasi data kekerasan *brinell* dapat dijelaskan oleh parameter proses yang diteliti, sehingga model ANOVA yang digunakan dinilai cukup baik dan representatif. Secara keseluruhan, hasil ANOVA menunjukkan bahwa *holding time* dan suhu air berpengaruh signifikan terhadap kekerasan *brinell*, dengan *holding time* sebagai parameter paling dominan, sedangkan kecepatan putar *tool* memberikan pengaruh yang relatif kecil dan tidak signifikan secara statistik.

Tabel 5. *Analysis of Variance Kekerasan Brinell*

<i>Source</i>	<i>DF</i>	<i>Seq SS</i>	<i>Contribution</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F-value</i>	<i>P-Value</i>
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%				

Nilai F-hitung hasil analisis varian (ANOVA) dibandingkan dengan F-tabel pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ untuk menentukan signifikansi pengaruh perlakuan serta keputusan terhadap hipotesis nol (H_0). Nilai F-tabel ditentukan berdasarkan derajat kebebasan, yaitu df_1 (jumlah parameter proses - 1) dan df_2 (jumlah spesimen - jumlah faktor). Dengan $df_1 = 2$ dan $df_2 = 6$ diperoleh F-tabel sebesar 5,14. Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) terhadap kekuatan geser dan kekerasan *brinell* aluminium AA1100. Jika F-hitung $> 5,14$, maka H_0 ditolak dan perlakuan dinyatakan berpengaruh signifikan.

1. Berdasarkan hasil uji F pada analisis ANOVA, parameter kecepatan putar (N) memperoleh nilai F-hitung sebesar 3,26 dan *Holding Time* (HT) sebesar 0,55. Kedua nilai tersebut lebih kecil daripada F-tabel (5,14), sehingga H_0 diterima. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan putar dan *holding time* tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan geser sambungan UFSSW pada taraf signifikansi 5%. Sebaliknya, parameter *Water Temperature* (WT) memiliki nilai F-hitung sebesar 5,25 yang lebih besar dari F-tabel (5,14). Dengan demikian, H_0 ditolak dan H_1 diterima, yang berarti WT berpengaruh signifikan terhadap kekuatan geser dan menjadi parameter yang paling dominan pada pengujian ini.
2. Pada pengujian kekerasan *brinell*, parameter kecepatan putar (N) menunjukkan nilai F-hitung sebesar 9,58 yang lebih besar daripada F-tabel (5,14). Oleh karena itu, H_0 ditolak dan H_1 diterima, yang mengindikasikan bahwa kecepatan putar berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan *brinell*. Selain itu, *Water Temperature* (WT) sebesar 22,28 dan *Holding Time* (HT) sebesar 25,20, yang keduanya juga lebih besar dari F-tabel. Dengan demikian, H_0 ditolak untuk kedua parameter tersebut, sehingga dapat disimpulkan bahwa WT dan HT berpengaruh signifikan terhadap kekerasan *brinell*, dengan *holding time* sebagai parameter yang paling dominan karena memiliki nilai F-hitung terbesar.

VII. SIMPULAN

Berdasarkan rumusan masalah penelitian pada hasil pengujian, dapat disimpulkan. Parameter proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) terhadap kekuatan geser sambungan aluminium AA1100 hasil penelitian pada analisis *General Linear Model* (GLM) ANOVA menunjukkan bahwa kekuatan geser maksimum sebesar 22,95 MPa diperoleh pada parameter suhu air 60 °C dengan nilai kontribusi sebesar 52,21%, sedangkan base metal memiliki kekuatan geser 55,05 MPa, yang menunjukkan berpengaruh signifikan terhadap kekuatan geser.

Parameter proses *Underwater Friction Stir Spot Welding* (UFSSW) terhadap nilai kekerasan *brinell* sambungan aluminium AA1100 hasil penelitian pada analisis *General Linear Model* (GLM) ANOVA menunjukkan bahwa nilai kekerasan *brinell* sebesar 53,5 HB diperoleh pada parameter kecepatan putar 1200 dengan nilai kontribusi sebesar 16,50%, suhu air 60 °C dengan nilai kontribusi sebesar 38,38% dan waktu penahanan 7 detik dengan nilai kontribusi sebesar 43,40%, sambungan relatif mendekati *base metal* sebesar 53,6 HB, yang menunjukkan berpengaruh signifikan terhadap kekerasan *brinell*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Keberhasilan selesainya penelitian ini dikarenakan rahmat dan kebaikan Allah SWT, yang bagi-Nya segala puji dan syukur layak diberikan. Penulis mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua atas doa dan dukungannya, kepada dosen pembimbing serta seluruh pihak yang telah membantu proses penelitian, kepada calon istri Keysa Putri Subagiyo atas dukungan dan pendampingannya, serta kepada Mahasiswa Bimbingan AK.22 PSTM Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah membantu dalam pengambilan data penelitian

REFERENSI

- [1] Mulyadi, A. Wahjudi, A. S. Pramono, I. M. L. Batan, And Ubaidillah, "A Study Of Concave Shoulder Angle On The Mechanical Properties And Fractography Of Friction Stir Welded Aa6061-T651 Joints," *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 28, Pp. 78–86, 2024, Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.258>.
- [2] 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.
- [3] M. Umer *Et Al.*, "Parametric Optimisation Of Friction Stir Welding On Aluminium Alloy (En Aw-1100) Plates," Vol. 63, No. 2, Pp. 75–88, 2023.
- [4] "Teknisi212,+Journal+Manager,+Sifat+Mekanik+Micro+Friction+Stir+Welding+Pada+Plat+Aluminium+Aa+1100+Dengan+Ketebalan+400+Mm.Pdf"
- [5] "Pengaruh Kecepatan Tool Pada Dissimilar Metal Aluminium 1100 Dan 5052 Terhadap Kualitas Hasil Pengelasan Dengan Metode Las Gesek Puntir (Friction Stir Welding) (Skripsi) Oleh Deo Renaldo Scorpion," 2019.
- [6] M. I. P And M. Darsin, "Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Aluminium Aa1100 Hasil Pengelasan Friction Stir Welding Dengan Variasi Feed Rate," Vol. 0.
- [7] A. S. F. P *Et Al.*, "Analisis Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Aluminium Aa 1100 Dengan Metode Friction Stir Welding (Fsw) Analisis Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Aluminium Aa 1100 Tinggi , Tahan Terhadap Karat , Konduktor Listrik Yang Cukup Baik Dan Aluminium Lebih Ringan In," No. September, 2015.
- [8] S. A. Solanki, A. B. Dhruv, S. Sen, T. Singh, And Y. Sharma, "Effect Of Rotation Speed And Welding Speed On Friction Stir Welding Of Aa1100 Aluminium Alloy Effect Of Rotation Speed And Welding Speed On Friction Stir Welding Of Aa1100 Aluminium Alloy," 2018, Doi: 10.1088/1757-899x/346/1/012060.
- [9] G. Çam, V. Javaheri, And A. Heidarzadeh, "Advances In Fsw And Fssw Of Dissimilar Al-Alloy Plates," *J. Adhes. Sci. Technol.*, Vol. 37, No. 2, Pp. 162–194, 2023, Doi: 10.1080/01694243.2022.2028073.
- [10] D. R. Scorpion *Et Al.*, "(Friction Stir Welding) 1100 Dan 5052 Terhadap Kualitas Hasil Pengelasan Dengan Metode Las Gesek Puntir," Vol. 5, No. 1, Pp. 1–7, 2019.
- [11] P. Rupajati And P. Rupajati, "Investigasi Dan Optimasi Parameter Proses Micro Friction Stir Spot Welding Material A1100/Cu1100p Menggunakan Metode Taguchi," *J. Tek. Mesin Iti*, Vol. 3, No. 2, P. 59, 2019, Doi: 10.31543/Jtm.V3i2.340.
- [12] F. Stir, W. Dengan, And V. Feed, "Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Aluminium Aa1100 Hasil Pengelasan Friction Stir Welding Dengan Variasi Feed Rate Moh. Indra P, Mahros Darsin, Sumarji," Pp. 15–22, 1991.
- [13] H. Suryanto, J. T. Mesin, F. Teknik, And U. N. Malang, "Pengaruh Variasi Arus Listrik Pengelasan Titik (Spot Welding) Terhadap Kekuatan Geser , Kekerasan Dan Struktur Mikro Pada Sambungan Dissimilar Baja Stainless Steel Aisi 304 Dengan Baja Karbon Rendah St 41," No. 2, 2016.
- [14] "Makalah.Pdf"
- [15] D. Handoko, T. Prihantono, A. Setiawan, And J. T. Mesin, "Analisa Variasi Putaran Friction Welding Terhadap Kekerasan Logam Aluminium Paduan Seri 1100-H18," Vol. 3, No. 2, Pp. 15–20, 2022, Doi: 10.35970/Accurate.
- [16] R. F. A. Putra, "Pengaruh Sudut Kemiringan Tool Micro Friction Stir Welding Terhadap Sifat Fisis Dan Mekanis Pada Sambungan Aluminium 1100," Pp. 1–67, 2020, [Online]. Available: <https://etd.umy.ac.id/id/eprint/2845/4/Bab1.Pdf>

- [17] A. Khalkhali, M. Sarmadi, And E. Sarikhani, "Investigation On The Best Process Criteria For Lap Joint Friction Stir Welding Of Aa1100 Aluminum Alloy Via Taguchi Technique And Anova," Vol. 231, No. 2, Pp. 329–342, 2017, Doi: 10.1177/0954408916665651.
- [18] M. Z. Saban *Et Al.*, "Prosiding Snttm Xxii 2024," Vol. 22, Pp. 103–109, 2024, Doi: 10.71452/590897.

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.