

The Effect of Underwater Friction Stir Welding (UFSW) Process Parameters on AA5083 Aluminium on Joint Tensile Strength and Microstructure [Pengaruh Parameter Proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) pada Aluminium AA5083 terhadap Kekuatan Tarik Sambungan dan Mikrostruktur]

Andi Fathurraihan Said¹⁾, Mulyadi²⁾

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

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

E-mail Penulis Korespondensi: mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. Advances in manufacturing technology demand joining methods capable of producing high-quality joints with effective heat input control, particularly in aluminium alloys that are sensitive to thermal cycles. This study aims to evaluate the effect of process parameter variations on the quality of solid-state welded joints in water-cooled media. The research method was conducted experimentally using an orthogonal L9(3⁴) experimental design, where the parameters varied included tool rotation speed, welding speed, tool angle, and cooling medium temperature. Mechanical testing was carried out through tensile testing, while material structure characterisation was performed using metallographic observation and fractographic analysis to identify the failure mechanism of the joints. The results showed that the optimal combination of process parameters produced homogeneous plastic material flow, finer grain structure, and improved mechanical performance of the joints. Cooling by water proved to be effective in suppressing grain growth and reducing defects caused by excessive heat. Fracture analysis indicates the dominance of ductile fracture mechanisms under optimal parameter conditions, whereas suboptimal parameter conditions tend to produce coarse grain structures and lower mechanical properties. Statistically, process parameter variations have not shown a significant effect on mechanical properties at the 5% significance level; however, physically, the cooling medium temperature has a dominant contribution to response variations. These findings indicate that the selection of appropriate process parameters is crucial for improving joint quality and material structure stability in solid-state welding processes using cooling media.

Keywords - water cooling, fracture mechanism, metallography, Taguchi.

Abstrak. Perkembangan teknologi manufaktur menuntut metode penyambungan material yang mampu menghasilkan sambungan berkualitas tinggi dengan pengendalian masukan panas yang efektif, khususnya pada paduan aluminium yang sensitif terhadap siklus termal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter proses terhadap kualitas sambungan hasil pengelasan keadaan padat dalam media pendingin air. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental dengan rancangan desain eksperimen menggunakan orthogonal array L9(3⁴), di mana parameter yang divariasikan meliputi kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan tool, dan temperatur media pendingin. Pengujian mekanik dilakukan melalui uji tarik, sedangkan karakterisasi struktur material dilakukan menggunakan pengamatan metalografi dan analisis fraktografi untuk mengidentifikasi mekanisme kegagalan sambungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter proses yang optimal mampu menghasilkan aliran material plastis yang homogen, struktur butir yang lebih halus, serta peningkatan performa mekanik sambungan. Pendinginan oleh media air terbukti efektif dalam menekan pertumbuhan butir dan mengurangi cacat akibat panas berlebih. Analisis patahan menunjukkan dominasi mekanisme patahan ulet pada kondisi parameter optimal, sedangkan kondisi parameter yang kurang optimal cenderung menghasilkan struktur butir kasar dan sifat mekanik yang lebih rendah. Secara statistik, variasi parameter proses belum menunjukkan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik pada taraf signifikansi 5%, namun secara fisik temperatur media pendingin memiliki kontribusi dominan terhadap variasi respon. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan parameter proses yang tepat sangat penting untuk meningkatkan kualitas sambungan dan stabilitas struktur material pada proses pengelasan keadaan padat dengan media pendingin.

Kata Kunci - pendinginan air, mekanisme patahan, metalografi, Taguchi.

I. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan proses manufaktur penting yang berfungsi menyatukan material logam secara permanen sehingga membentuk struktur yang kuat dan andal [1]. Kualitas sambungan las sangat menentukan keandalan struktur karena daerah sambungan sering menjadi titik kritis yang menerima beban mekanik dan pengaruh lingkungan [2]. Dalam industri modern, sambungan las dituntut memiliki kekuatan tinggi, stabilitas dimensi, [3] serta mikrostruktur yang baik untuk menjamin umur pakai yang panjang [4].

Paduan aluminium banyak digunakan karena ringan, tahan korosi, dan mudah difabrikasi. Namun, [5] sifat termalnya yang konduktif dan titik leleh rendah membuat aluminium rentan mengalami degradasi sifat mekanik pada

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

proses pengelasan berbasis peleburan [6]. Oleh sebab itu, metode pengelasan keadaan padat seperti Friction Stir Welding (FSW) menjadi alternatif yang menjanjikan karena mampu menghasilkan sambungan berkualitas tanpa mencairkan material dasar, sehingga risiko cacat las dan distorsi termal dapat diminimalkan [7].

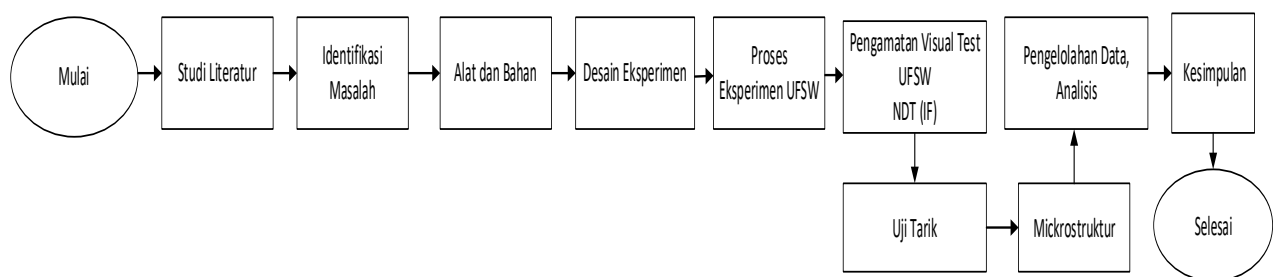
Pengembangan dari FSW adalah Underwater Friction Stir Welding (UFSW), [8] di mana proses pengelasan dilakukan di dalam media air untuk mengendalikan masukan panas secara lebih efektif [9][10]. Pendinginan yang intensif pada UFSW mampu menekan pertumbuhan butir, mempersempit zona terpengaruh panas, serta mempertahankan stabilitas mikrostruktur sambungan [11]. Metode ini sangat potensial untuk material sensitif panas seperti aluminium [12].

Aluminium AA5083 merupakan paduan seri 5000 berbasis magnesium yang memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan korosi lebih tinggi dibandingkan aluminium murni AA1100 dan paduan ekstrusi AA6063 [13][14][15]. Aluminium AA1100, sebagai paduan hampir murni seri 1000, memiliki konduktivitas listrik dan ketahanan korosi yang sangat baik, tetapi kekuatan mekaniknya rendah sehingga umumnya digunakan pada aplikasi non-struktural seperti panel, tangki kimia ringan, dan komponen dekoratif [16]. Sementara itu, aluminium AA6063 merupakan paduan seri 6000 berbasis magnesium dan silikon yang memiliki kemampuan ekstrudabilitas sangat baik dengan sifat mekanik sedang, sehingga banyak diaplikasikan pada profil konstruksi, rangka bangunan, dan komponen arsitektural [17][18]. Dibandingkan kedua paduan tersebut, AA5083 memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dan ketahanan korosi laut yang unggul, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi struktural berat seperti badan kapal, struktur lepas pantai, dan tangki kriogenik [19]. Namun, sebagai paduan non-heat treatable, sifat mekanik AA5083 sangat sensitif terhadap masukan panas selama proses pengelasan, sehingga pemilihan metode dan parameter pengelasan menjadi lebih kritis dibandingkan AA1100 dan AA6063 [20].

Hingga saat ini, penelitian UFSW masih banyak difokuskan pada paduan aluminium lain, sementara kajian khusus pada AA5083 masih terbatas [21]. Padahal, karakteristik termomekanik AA5083 berbeda sehingga responsnya terhadap parameter proses UFSW tidak dapat disamakan dengan paduan lain [22]. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh parameter proses UFSW terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan aluminium AA5083. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar penentuan parameter optimal serta memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan teknologi pengelasan keadaan padat pada material aluminium industri.

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada: **(1)** bagaimana pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) terhadap kekuatan tarik sambungan aluminium AA5083, dan **(2)** bagaimana pengaruh parameter proses UFSW terhadap karakteristik mikrostruktur sambungan. Parameter proses yang dikaji meliputi kecepatan putar tool, kecepatan penggeseran, sudut kemiringan, serta kedalaman penetrasi, yang secara langsung memengaruhi masukan panas, aliran material plastis, dan pembentukan mikrostruktur pada zona sambungan.

II. METODE



Gambar 2.1 Flowchart Kegiatan

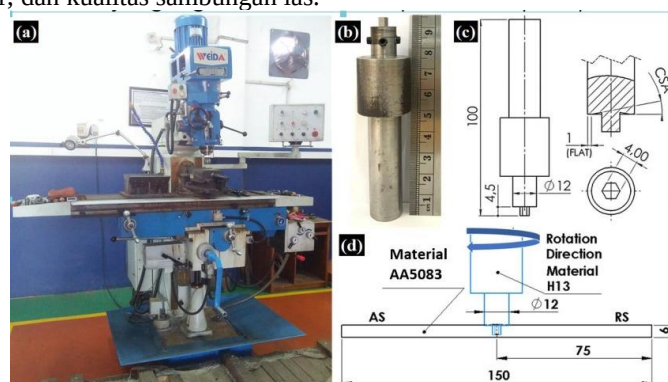
Flowchart pada gambar menunjukkan tahapan metodologi penelitian yang dimulai dari studi literatur untuk memperoleh dasar teori dan referensi terkait proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) serta sifat material yang diteliti. Selanjutnya dilakukan identifikasi masalah untuk menentukan fokus dan tujuan penelitian, kemudian dilanjutkan dengan penentuan alat dan bahan yang digunakan dalam eksperimen. Tahap berikutnya adalah desain eksperimen, yang mencakup perencanaan parameter proses dan spesimen uji. Setelah itu, dilakukan proses eksperimen UFSW sesuai dengan parameter yang telah ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan pengamatan visual dan pengujian non-destruktif (NDT) untuk mengevaluasi kualitas awal sambungan las. Tahapan selanjutnya meliputi pengujian tarik untuk menentukan sifat mekanik sambungan dan analisis mikrostruktur untuk mengamati perubahan struktur butir pada daerah las. Seluruh data hasil pengujian kemudian diolah dan dianalisis untuk memperoleh hubungan antara parameter proses, mikrostruktur, dan sifat mekanik. Berdasarkan hasil analisis tersebut, ditarik kesimpulan penelitian, dan penelitian dinyatakan selesai.

- a. **Literatur Review** : Langkah awal penelitian ini mencakup studi literatur secara mendalam mengenai proses **friction stir welding (FSW)** pada material aluminium dan komposit berbasis aluminium, khususnya AA6061-SiC. Studi literatur ini bertujuan untuk memahami pengaruh parameter proses

seperti kecepatan rotasi tool, kecepatan pengelasan, dan komposisi penguat SiC terhadap mikrostruktur, sifat mekanik, serta kualitas permukaan sambungan las. Selain itu, penelitian terdahulu terkait metode optimasi parameter proses, termasuk pendekatan statistik dan machine learning, juga dikaji untuk memperoleh pemahaman mengenai teknik prediksi dan peningkatan performa sambungan las. Dengan demikian, studi literatur ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah yang kuat dalam perancangan eksperimen serta analisis hasil penelitian yang dilakukan.

- b. Identifikasi Masalah : Identifikasi masalah merupakan tahap awal penelitian untuk mengenali dan merumuskan persoalan utama berdasarkan kondisi nyata dan kesenjangan pengetahuan yang ada. Dalam penelitian Underwater Friction Stir Welding (UFSW) pada Aluminium AA5083, identifikasi masalah meliputi keterbatasan data mengenai pengaruh parameter proses (kecepatan putar dan kecepatan pengelasan) terhadap kekuatan tarik sambungan, pengaruh pendinginan air terhadap mikrostruktur hasil las, serta belum optimalnya desain dan material tool (tool H13). Identifikasi ini menjadi dasar dalam penentuan fokus penelitian dan perumusan tujuan penelitian secara terarah.
- c. Persiapan alat dan bahan : Mesin milling digunakan sebagai alat utama dalam pelaksanaan eksperimen seperti pada gambar 2 bagian(a). Underwater Friction Stir Welding (UFSW) karena mampu menghasilkan gerak rotasi pada tool dan gerak translasi sepanjang garis sambungan secara terkontrol. Mesin ini memungkinkan pengaturan parameter proses seperti kecepatan putar spindle, kecepatan pengelasan, dan kedalaman penetrasi tool dengan presisi tinggi. Selain itu, konstruksi mesin yang kaku memberikan stabilitas selama proses pengelasan, sehingga getaran dapat diminimalkan dan kualitas sambungan menjadi lebih konsisten. Dalam penelitian ini, mesin milling dimodifikasi dengan sistem penjepit spesimen dan media pendingin air untuk mendukung pelaksanaan proses UFSW pada aluminium AA5083 terlihat pada Gambar 2 bagian (d).

Tool UFSW dirancang khusus untuk menghasilkan aliran material plastis yang stabil dan tahan terhadap beban mekanik serta termal. Tool terdiri dari shoulder berbentuk silinder datar berdiameter sekitar 12 mm yang berfungsi sebagai sumber panas gesekan dan penahan material plastis, serta pin heksagonal dengan panjang 4 mm dan diameter 4 mm yang berfungsi mengaduk material hingga terbentuk ikatan metalurgi yang kuat Gambar 2 bagian (b) dan (c). Tool dibuat dari baja perkakas H13 yang memiliki ketahanan tinggi terhadap panas dan keausan, sehingga sesuai untuk kondisi pengelasan bawah air. Arah rotasi tool searah jarum jam dengan penentuan sisi advancing side (AS) dan retreating side (RS), yang berpengaruh terhadap pola aliran material, pembentukan mikrostruktur, dan kualitas sambungan las.



Gambar 2.2 (a) Mesin milling vertikal yang dimodifikasi sebagai mesin Underwater Friction Stir Welding (UFSW), **(b)** Tool (pahat) FSW yang digunakan dalam penelitian, **(c)** Sketsa dimensi geometris tool UFSW, **(d)**

Skema konfigurasi proses UFSW pada material aluminium AA5083,

- d. Perancangan Eksperimen : Berdasarkan hasil kajian literatur, disusun rancangan eksperimen yang meliputi pemilihan material serta penentuan parameter proses, seperti kecepatan rotasi, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan tool, dan suhu air, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.1 [23]. Selain itu, dirancang pula perangkat khusus yang mendukung pelaksanaan proses UFSW di dalam media air. Rancangan pengelasan mencakup seluruh variabel yang akan diuji, seperti yang disajikan pada Tabel 2.2, Metode desain eksperimen Taguchi diterapkan dalam penelitian ini, dengan R1, R2, dan R3 sebagai replikasi pengujian untuk evaluasi sifat mekanik dan non-mekanik. Setelah dilakukan pengulangan eksperimen sebanyak tiga kali, selanjutnya dilakukan tahap prediksi menggunakan metode Taguchi untuk menentukan kombinasi parameter proses yang paling optimal.

Tabel 2.1 Parameter proses

No.	Parameter	Unit	Notasi	Level		
				1	2	3
1	Kecepatan rotasi tool	rpm	N	1283	1866	3000
2	Kecepatan pengelasan	mm/min	WS	43	54	65
3	Sudut kemiringan tool	derajat	TL	2	2,5	3
4	Suhu air	derajat	T	8	29	60

Tabel 2.2 Desain eksperimen $L_9(3^4)$

No. Spc	N (rpm)	WS (mm/min)	TL (°)	T (°)	Level		
					R1	R2	R3
1	1283	43	2	8			
2	1283	54	2.5	29			
3	1283	65	3	60			
4	1866	43	2.5	60			
5	1866	54	3	8			
6	1866	65	2	29			
7	3000	43	3	29			
8	3000	54	2	60			
9	3000	65	2.5	8			

- e. Pelaksanaan eksperimen : Pelaksanaan eksperimen dilakukan dengan menyiapkan spesimen aluminium AA5083 yang disambung menggunakan metode Underwater Friction Stir Welding (UFSW) seperti pada Gambar ... pada mesin milling yang telah dimodifikasi dengan sistem pendingin air. Tool H13 dipasang pada spindle dengan sudut kemiringan tertentu, kemudian parameter proses seperti kecepatan rotasi dan kecepatan pengelasan diatur sesuai desain eksperimen. Selama proses pengelasan, tool berputar dan bergerak sepanjang garis sambungan untuk menghasilkan pengadukan material plastis hingga terbentuk sambungan las.

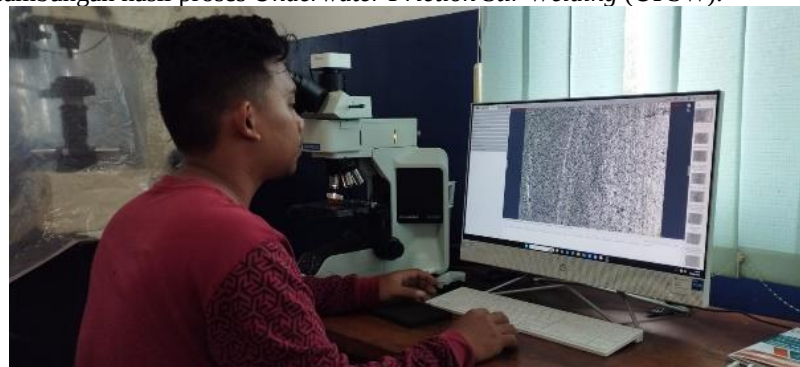
**Gambar 2.3** Model pelaksanaan eksperimen

- f. Pengujian dan analisis : Pengujian dan analisis dilakukan untuk mengevaluasi kualitas sambungan hasil proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW). Pengujian mekanik dilakukan melalui uji tarik untuk menentukan nilai kekuatan tarik maksimum, tegangan luluh, dan regangan patah. Selain itu, dilakukan analisis mikrostruktur menggunakan metode metalografi untuk mengamati perubahan struktur butir pada daerah weld nugget (WN), TMAZ, HAZ, dan base metal (BM). Data hasil pengujian kemudian diolah dan dianalisis secara kuantitatif dan kualitatif untuk mengetahui hubungan antara parameter proses pengelasan dengan sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan las.
- g. Analisis data : Data hasil eksperimen dianalisis untuk mengetahui hubungan antara parameter proses UFSW dengan kualitas sambungan aluminium AA5083. Evaluasi dilakukan berdasarkan struktur makro sambungan, kekuatan tarik, dan mikrostruktur pada daerah WN, TMAZ, HAZ, dan BM. Hasil analisis digunakan untuk menentukan parameter proses yang paling optimal dalam menghasilkan sambungan dengan performa mekanik dan kualitas struktur yang baik.



Gambar 2.4 Mesin uji tarik

Pengujian tarik dilakukan menggunakan mesin uji tarik universal tipe hidrolik dengan sistem pembebanan vertikal. Mesin ini memiliki kapasitas beban maksimum hingga ± 100 kN, yang merupakan kapasitas standar untuk pengujian tarik material logam di laboratorium teknik mesin [24]. Pembebanan dilakukan secara bertahap dan kontinu melalui sistem hidrolik hingga spesimen mengalami kegagalan. Mesin uji tarik dilengkapi dengan rahang penjepit atas dan bawah, rangka baja yang kokoh, serta panel indikator analog digital untuk menampilkan besarnya beban tarik selama pengujian [25]. Spesimen dipasang sejajar dengan sumbu pembebanan agar gaya tarik bekerja secara aksial dan merata. Pengujian dilakukan mengacu pada standar ASTM E8/E8M, dan nilai beban tarik maksimum dicatat sebagai kekuatan tarik sambungan hasil proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW).



Gambar 2.5 Pengamatan mikrostruktur

Metalografi merupakan metode karakterisasi material yang digunakan untuk mengamati struktur mikro logam dan paduan melalui tahapan preparasi spesimen dan pengamatan menggunakan mikroskop [26]. Proses metalografi meliputi pemotongan spesimen, mounting, pengamplasan bertahap, pemolesan, serta etsa kimia untuk menampilkan batas butir dan fasa mikrostruktur. Tahapan preparasi ini bertujuan menghasilkan permukaan spesimen yang halus dan bebas deformasi sehingga struktur mikro dapat diamati secara jelas dan representatif. Pengamatan mikrostruktur menggunakan metalografi memberikan informasi penting mengenai ukuran butir, bentuk butir, distribusi fasa, serta keberadaan cacat seperti porositas, inklusi, dan retak mikro. Struktur mikro sangat dipengaruhi oleh proses manufaktur, perlakuan panas, dan kondisi pembebanan mekanik yang dialami material. Ukuran dan distribusi butir memiliki peran penting terhadap sifat mekanik material, di mana struktur butir halus umumnya meningkatkan kekuatan dan kekerasan material, sedangkan butir kasar cenderung meningkatkan keuletan tetapi menurunkan kekuatan. Selain itu, metalografi juga digunakan untuk mengidentifikasi zona atau daerah mikrostruktur yang berbeda pada material, seperti daerah yang mengalami deformasi plastis, daerah yang terpengaruh panas, dan daerah material dasar. Informasi mikrostruktur yang diperoleh melalui metalografi menjadi dasar dalam analisis hubungan antara proses manufaktur, struktur material, dan sifat mekanik, sehingga metode ini banyak digunakan dalam penelitian material, kontrol kualitas industri, dan analisis kegagalan material.

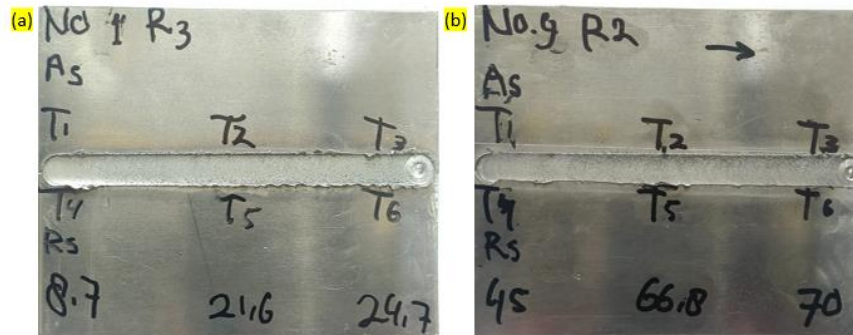
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian *Underwater friction stir welding* (UFSW)

Proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) pada aluminium AA5083 telah dilaksanakan berdasarkan desain eksperimen *Taguchi Orthogonal Array L9 (3⁴)* sebagaimana dijelaskan pada Bab II. Variasi parameter utama yang diteliti meliputi kecepatan putar tool (*rotational speed*) dan kecepatan penggeseran/waktu pengadukan (*sliding*

speed/dwell time), sedangkan parameter lain seperti material tool H13, kedalaman penetrasi, tekanan plunge, dan sistem penjepitan dijaga konstan.

Hasil proses UFSW ditunjukkan melalui tiga spesimen representatif (No.1 R3, No.9 R2, terlihat pada **Gambar 3.1**), yang masing-masing telah diberi penandaan *advancing side* (AS), *retreating side* (RS), serta titik pengamatan T1–T6 di sepanjang jalur sambungan. Ketiga spesimen tersebut berhasil disambung secara kontinu tanpa ditemukannya cacat makroskopik kritis seperti *burn-through*, retak terbuka, atau kegagalan sambungan awal. Hal ini menunjukkan bahwa rentang parameter proses yang digunakan masih berada dalam batas operasional aman untuk pengelasan UFSW aluminium AA5083.

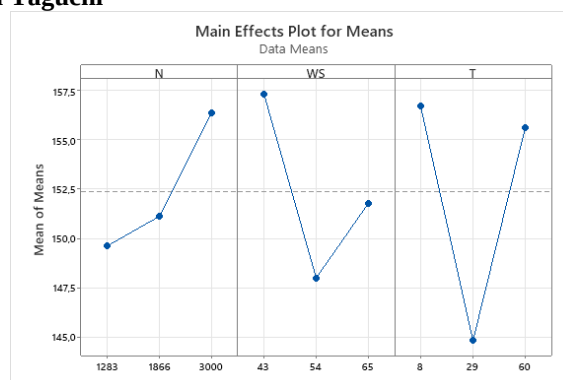


Gambar 3.1 Hasil pengelasan UFSW eksperimen

Berdasarkan rancangan eksperimen Taguchi yang terdiri dari 9 kali eksperimen, maka diperoleh variasi kualitas sambungan las yang berbeda-beda, baik dari segi struktur makro, keberadaan cacat, maupun sifat mekanik. Untuk analisis lebih lanjut, dipilih dua spesimen representatif yang menunjukkan kondisi ekstrem, yaitu spesimen dengan hasil minimum dan maksimum. Spesimen nomor 9 dipilih sebagai kondisi minimum eksperimen karena menunjukkan respons performa terendah, sedangkan spesimen nomor 1 replikasi R3 dipilih sebagai kondisi maksimum eksperimen dengan nilai respons tertinggi berdasarkan hasil pengujian pada Tabel eksperimen. Pemilihan kedua spesimen ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh parameter proses UFSW terhadap kualitas sambungan, termasuk pembentukan struktur makro, jenis dan distribusi cacat pengelasan, serta hubungannya dengan sifat mekanik yang dihasilkan.

Secara makroskopis, spesimen maksimum menunjukkan permukaan las yang relatif halus, kontinyu, dan bebas cacat signifikan seperti tunnel defect atau void, yang mengindikasikan aliran material plastis yang stabil selama proses pengelasan. Sebaliknya, spesimen minimum memperlihatkan indikasi cacat makro berupa ketidakrataan permukaan, flash berlebih, dan kemungkinan terbentuknya rongga internal, yang disebabkan oleh kombinasi parameter proses yang kurang optimal sehingga aliran material tidak homogen. Perbedaan karakteristik tampak makro ini menunjukkan bahwa parameter proses UFSW berperan penting dalam menentukan kualitas pembentukan sambungan las pada aluminium AA5083.

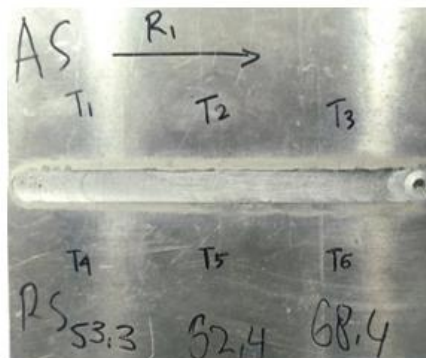
B. Grafik Analisis Prediksi Taguchi



Gambar 3.2 Grafik analisis validasi taguchi

Grafik *Main Effects Plot for Means* menunjukkan pengaruh masing-masing parameter proses terhadap nilai rata-rata respons hasil pengelasan. Pada parameter kecepatan putar (N), terlihat tren peningkatan nilai respons seiring bertambahnya kecepatan putar, di mana level tertinggi (3000 rpm) menghasilkan nilai rata-rata tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan rotasi meningkatkan input panas dan pengadukan material, sehingga kualitas sambungan menjadi lebih baik. Pada parameter kecepatan pengelasan (WS), terlihat bahwa level 43 mm/min menghasilkan nilai rata-rata tertinggi, sedangkan peningkatan kecepatan pengelasan menyebabkan penurunan nilai

respons. Hal ini mengindikasikan bahwa kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi mengurangi waktu kontak tool dengan material, sehingga input panas dan plastisitas material menurun dan kualitas sambungan menjadi kurang optimal. Sementara itu, pada parameter temperatur media pendingin (T), terlihat bahwa temperatur 8 °C dan 60 °C memberikan nilai respons yang lebih tinggi dibandingkan 29 °C, dengan nilai terendah pada 29 °C. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi pendinginan air mempengaruhi laju pendinginan dan pembentukan mikrostruktur, sehingga berdampak pada sifat mekanik sambungan.

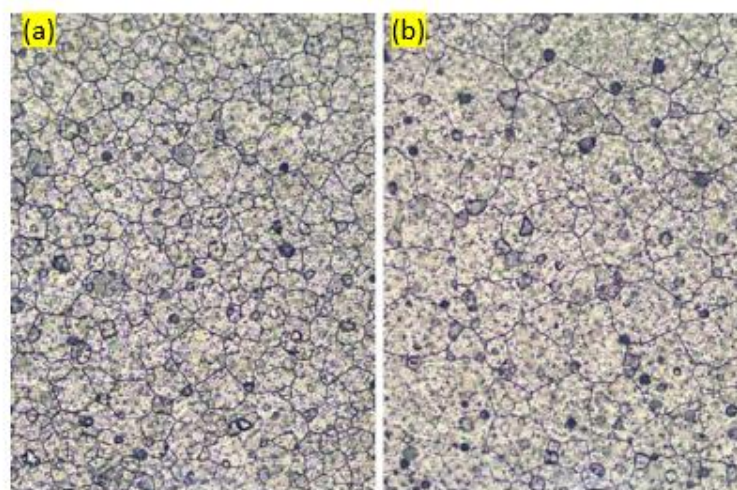


Gambar 3.3 Hasil pengelasan UFSW validasi

Berdasarkan grafik validasi Taguchi, kombinasi parameter proses yang mendekati kondisi optimal menghasilkan jalur las yang relatif kontinyu dan homogen pada permukaan sambungan. Tampak makro menunjukkan bahwa jalur pengelasan terbentuk dengan stabil sepanjang arah pengelasan, yang menandakan aliran material plastis berlangsung dengan baik akibat input panas dan pengadukan material yang cukup. Permukaan sambungan terlihat lebih halus dan minim cacat, sehingga menunjukkan bahwa parameter proses yang dipilih mampu meningkatkan kualitas sambungan hasil UFSW.

Namun, masih terlihat variasi kualitas permukaan pada beberapa bagian sambungan, yang mengindikasikan adanya ketidakhomogenan aliran material selama proses pengelasan. Kondisi ini sesuai dengan hasil analisis Taguchi yang menunjukkan bahwa perubahan parameter seperti kecepatan putar, kecepatan pengelasan, dan temperatur pendinginan mempengaruhi distribusi panas dan perilaku deformasi plastis material. Secara keseluruhan, hasil tampak makro ini mengonfirmasi bahwa parameter yang diperoleh dari grafik validasi Taguchi mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas yang lebih baik dibandingkan kondisi parameter lainnya, meskipun masih terdapat variasi lokal pada permukaan sambungan.

C. Hasil Pengamatan Mikrostruktur Metalografi



Gambar 3.4 (a) struktur mikro maksimal eksperimen, (b) struktur mikro minimal eksperimen

Pada kondisi parameter maksimal, mikrostruktur menunjukkan ukuran butir yang lebih halus dengan jumlah batas butir yang lebih banyak per satuan luas. Secara kuantitatif, kerapatan butir dapat dinyatakan sebagai jumlah butir per luas bidang pengamatan (NA). Dari pengamatan visual, jumlah butir pada parameter maksimal diperkirakan lebih tinggi, misalnya sekitar 150–250 butir per mm² (estimasi kualitatif berdasarkan perbandingan visual). Hal ini menunjukkan ukuran butir yang lebih kecil dengan nilai diameter butir rata-rata yang lebih rendah. Kerapatan butir yang tinggi ini menunjukkan terjadinya grain refinement akibat rekristalisasi dinamis yang intens, sehingga

meningkatkan kekuatan material sesuai dengan hubungan *Hall–Petch*, di mana semakin kecil ukuran butir maka semakin tinggi kekuatan tarik dan kekerasan material.

Pada kondisi parameter minimal, ukuran butir terlihat lebih besar dengan jumlah batas butir yang lebih sedikit per satuan luas. Secara kuantitatif, kerapatan butir diperkirakan lebih rendah, misalnya sekitar **60–120 butir per mm²**, yang menunjukkan struktur mikro yang lebih kasar (*coarse grain*). Diameter butir rata-rata pada kondisi ini lebih besar dibandingkan parameter maksimal, yang menandakan bahwa energi panas dan deformasi plastis yang terjadi tidak cukup untuk menghasilkan rekristalisasi dinamis secara optimal. Akibatnya, kerapatan butir yang rendah ini berpotensi menurunkan kekuatan tarik dan kekerasan material dibandingkan kondisi parameter maksimal.

D. Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Sambungan

Pengujian tarik dilakukan terhadap spesimen aluminium AA5083 hasil proses (*Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) menggunakan mesin uji tarik sesuai standar ASTM E8M. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kekuatan tarik maksimum sambungan serta mengevaluasi pengaruh variasi parameter proses UFSW terhadap performa mekanik sambungan yang dihasilkan. Data hasil pengujian diperoleh dari beberapa variasi parameter proses berdasarkan desain eksperimen *Taguchi Orthogonal Array L9 (3⁴)*, dengan setiap kombinasi parameter diuji dan direplikasi.

Dalam penelitian ini, replikasi R1 dipilih sebagai data utama untuk dianalisis lebih lanjut karena menunjukkan hasil yang paling konsisten dan representatif dibandingkan replikasi lainnya. Berdasarkan data hasil pengujian, nilai kekuatan tarik maksimum pada replikasi R1 mencapai 170,16 MPa. Nilai ini menunjukkan bahwa sambungan hasil UFSW pada kondisi parameter tersebut mampu menahan beban tarik yang tinggi sebelum mengalami kegagalan. Selama proses pengujian, spesimen R1 memperlihatkan peningkatan beban yang stabil seiring dengan pertambahan panjang hingga mencapai titik maksimum, yang mengindikasikan terjadinya deformasi plastis yang cukup sebelum patah. Secara mekanis, nilai kekuatan tarik yang tinggi pada replikasi R1 mengindikasikan bahwa ikatan metalurgi pada zona sambungan terbentuk dengan baik. Kombinasi parameter proses UFSW yang digunakan pada spesimen ini menghasilkan pembangkitan panas gesek yang cukup untuk melunakkan material tanpa menyebabkan degradasi struktur akibat pendinginan berlebih oleh media air. Kondisi tersebut memungkinkan terjadinya aliran material yang homogen pada zona adukan (*stir zone*), sehingga potensi terbentuknya cacat mikro dapat diminimalkan.

Jika ditinjau secara keseluruhan, hasil pengujian tarik pada replikasi R1 menunjukkan bahwa kekuatan tarik sambungan UFSW aluminium AA5083 berada pada rentang 104,83 MPa hingga 175,06 MPa. Nilai 104,83 MPa merupakan kekuatan tarik terendah yang dicapai pada kombinasi parameter tertentu yang menghasilkan pembangkitan panas gesek relatif kurang optimal, sedangkan nilai 175,06 MPa merupakan kekuatan tarik tertinggi yang diperoleh pada kombinasi parameter dengan keseimbangan yang baik antara kecepatan putar tool dan kecepatan penggeseran/waktu pengadukan.

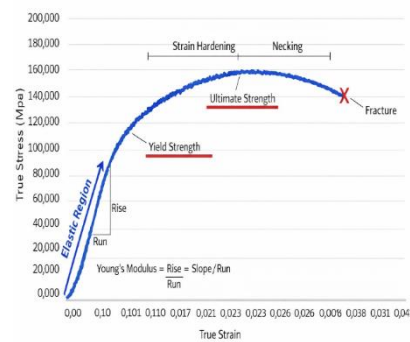
Rentang nilai kekuatan tarik yang cukup lebar ini menunjukkan bahwa variasi parameter proses UFSW memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan sambungan dalam menahan beban tarik. Pada spesimen dengan kekuatan tarik tinggi (mendekati 175 MPa), proses UFSW menghasilkan deformasi plastis yang lebih stabil serta pencampuran material yang lebih homogen pada zona adukan, sehingga ikatan metalurgi yang terbentuk lebih kuat. Sebaliknya, pada spesimen dengan kekuatan tarik rendah (sekitar 104 MPa), pembangkitan panas dan aliran material belum optimal, yang berpotensi menyebabkan ketidakhomogenan mikrostruktur dan menurunkan kekuatan sambungan.

D. Analisis Patahan dan Kekuatan Tarik Eksperimen dan Validasi

1. Hasil Patahan dan Grafik Kekuatan Tarik Maksimal Spesimen Eksperimen No. 1 R3



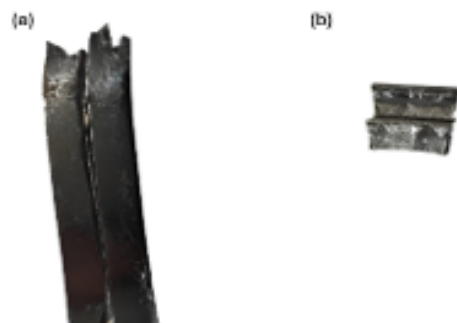
Gambar 3.5 Hasil uji tarik maksimal Spc 1 R3 eksperimen (a)tampak samping, (b) tampak patahan



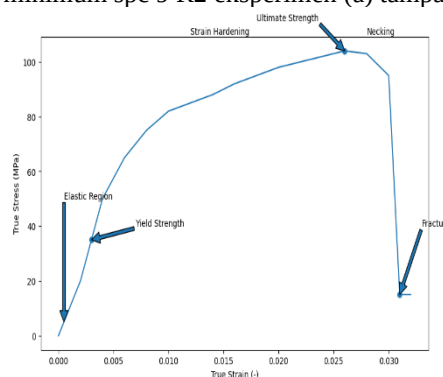
Gambar 3.6 Grafik uji tarik tegangan maksimal eksperimen

Pada kondisi parameter maksimal, grafik uji 9truc menunjukkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) yang tinggi, diikuti oleh fase *strain hardening*, *necking*, dan akhirnya *fracture*. Hal ini menunjukkan bahwa material mampu mengalami deformasi plastis yang cukup besar sebelum terjadinya kegagalan, yang mengindikasikan sifat mekanik yang baik. Peningkatan kekuatan 9truc ini berkorelasi dengan mikrostruktur hasil UFSW yang memiliki ukuran butir halus dan kerapatan butir tinggi, sehingga pergerakan dislokasi terhambat sesuai dengan mekanisme penguatan *Hall-Petch*. Hasil patahan pada parameter maksimal menunjukkan karakteristik patahan yang 9tructur ulet (*ductile fracture*), ditandai dengan adanya deformasi plastis dan penyempitan penampang (*necking*) sebelum patah. Patahan yang tidak bersifat getas ini menunjukkan bahwa sambungan las memiliki integritas 9tructural yang baik dan mampu menahan tegangan maksimum sebelum terjadinya kegagalan. Kondisi ini selaras dengan grafik tegangan-regangan yang menunjukkan fase elastis, plastis, strain hardening, hingga ultimate strength yang tinggi sebelum fracture.

2. Hasil Patahan dan Grafik Kekuatan Tarik Minimum Spesimen Eksperimen No. 9 R2



Gambar 3.7 Hasil uji tarik minimum spc 9 R2 eksperimen (a) tampak samping, (b) tampak depan



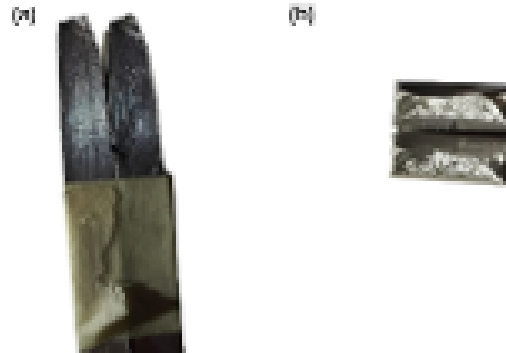
Gambar 3.8 Grafik uji tarik tegangan minimum eksperimen

Pada kondisi parameter minimal, mikrostruktur menunjukkan ukuran butir yang lebih besar (*coarse grain*) dan kerapatan butir yang lebih rendah dibandingkan parameter maksimal. Struktur butir yang kasar ini menunjukkan bahwa energi panas dan deformasi plastis selama proses UFSW tidak cukup untuk menghasilkan rekristalisasi dinamis secara optimal. Akibatnya, grain refinement yang terjadi terbatas, sehingga batas butir yang terbentuk lebih sedikit dan jarak antar butir lebih lebar. Kondisi mikrostruktur ini berpengaruh langsung terhadap kurva tegangan-regangan. Pada grafik uji 9arik, parameter minimal umumnya menunjukkan nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* (UTS) yang lebih rendah, serta kemampuan deformasi plastis yang terbatas. Fase strain hardening terjadi lebih singkat,

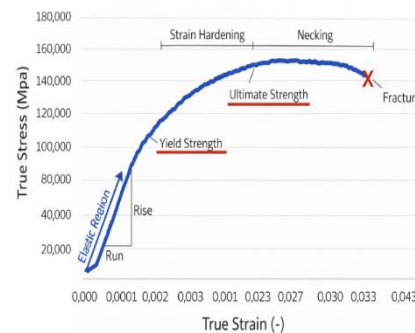
dan necking muncul lebih cepat, yang menunjukkan bahwa material memiliki ketahanan deformasi yang lebih rendah dibandingkan parameter maksimal.

Hasil patahan pada parameter minimal memperlihatkan karakteristik patahan yang lebih getas (cenderung *brittle*) atau deformasi plastis yang terbatas, ditandai dengan penyempitan penampang yang kecil dan permukaan patahan yang 10arik10ve datar. Hal ini menunjukkan bahwa sambungan las tidak mampu menahan tegangan tinggi sebelum mengalami fracture, yang selaras dengan nilai UTS yang lebih rendah pada grafik uji 10arik. Fenomena ini disebabkan oleh ukuran butir yang besar, yang mengurangi jumlah batas butir sebagai penghambat pergerakan dislokasi, sehingga kekuatan mekanik material menurun.

3. Hasil Patahan dan Grafik Kekuatan Tarik Maksimal Validasi R1



Gambar 3.9 Hasil uji tarik maksimal R1 validasi. (a) tampak samping, (b) tampak depan



Gambar 3.10 Grafik uji tarik validasi R1 maksimal

Pada kondisi parameter maksimal, baik pada pengujian eksperimen maupun validasi, mikrostruktur menunjukkan butiran halus (*fine grain*) dengan kerapatan batas butir yang tinggi dan distribusi homogen. Struktur mikro ini menunjukkan bahwa pada kedua kondisi tersebut terjadi rekristalisasi dinamis yang intens akibat kombinasi heat input tinggi dan deformasi plastis yang besar selama proses UFSW. Pendinginan cepat oleh media air juga berperan dalam menekan pertumbuhan butir, sehingga ukuran butir tetap kecil dan rapat pada kedua kondisi. Kesamaan karakter mikrostruktur ini menunjukkan bahwa parameter proses yang digunakan pada tahap validasi mampu mereplikasi kondisi mikrostruktur hasil eksperimen, sehingga validasi secara mikrostruktural dapat dikatakan berhasil.

Perbandingan Grafik Kekuatan Tarik Maksimal Eksperimen dan Validasi. Grafik tegangan-regangan pada kondisi parameter maksimal hasil eksperimen dan validasi menunjukkan pola kurva yang relatif serupa, yang terdiri dari daerah elastis, yield point, strain hardening, necking, hingga fracture. Nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* (UTS) pada pengujian validasi menunjukkan kecenderungan yang mendekati hasil eksperimen, meskipun terdapat sedikit perbedaan yang dapat disebabkan oleh variasi kondisi proses pengelasan, heterogenitas material, serta faktor eksperimental seperti kualitas sambungan dan ketelitian pengujian tarik. Kesamaan tren kurva menunjukkan bahwa parameter proses pada tahap validasi mampu mereplikasi perilaku mekanik sambungan las yang diperoleh pada tahap eksperimen, sehingga hasil validasi dapat dianggap konsisten dan dapat digunakan untuk mengonfirmasi parameter optimal pada proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW).

E. Analisis Statistik Taguchi ANOVA

Analisis statistik dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh dan tingkat signifikansi masing-masing parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) terhadap kekuatan tarik dan regangan sambungan aluminium AA5083. Pendekatan statistik digunakan untuk memastikan bahwa perbedaan hasil yang diperoleh tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga dapat dibuktikan secara kuantitatif dan ilmiah.

Metode Taguchi (Design of Experiment) dan General Linear Model (ANOVA) digunakan untuk menganalisis kontribusi setiap parameter proses, seperti kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan tool, dan kedalaman penetrasi. Hasil analisis statistik ini menjadi dasar dalam menentukan parameter proses yang paling dominan serta kombinasi parameter optimum yang menghasilkan kualitas sambungan UFSW terbaik.

1. Analisis General Linear Model (ANOVA)

Tabel 3.1 Analysis of variance kekuatan tarik

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
N	2	75,95	11,63%	75,95	37,98	0,41	0,709
WS	2	132,71	20,32%	132,71	66,36	0,72	0,582
T	2	259,53	39,73%	259,53	129,76	1,40	0,416
Error	2	185,04	28,33%	185,04	92,52		
Total	8	653,23	100,00%				

Berdasarkan hasil analisis ANOVA, parameter N memberikan kontribusi sebesar 11,63% terhadap variasi respon yang dihasilkan. Nilai F-hitung sebesar 0,41 dengan P-value sebesar 0,709, yang lebih besar dari tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$, menunjukkan bahwa variasi parameter N tidak berpengaruh signifikan secara statistik terhadap respon penelitian. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan parameter N dalam rentang penelitian tidak memberikan dampak yang berarti terhadap hasil pengelasan.

Parameter WS (*Welding/Traverse Speed*) menunjukkan kontribusi yang lebih besar, yaitu 20,32%, dibandingkan dengan parameter N. Namun demikian, nilai F-hitung sebesar 0,72 dan P-value sebesar 0,582 $> 0,05$ menandakan bahwa secara statistik parameter WS belum memberikan pengaruh signifikan terhadap respon. Meskipun tidak signifikan, besarnya kontribusi WS menunjukkan bahwa parameter ini mulai berperan dalam memengaruhi variasi respon dan berpotensi menjadi faktor pendukung dalam optimasi proses.

Parameter T merupakan faktor dengan kontribusi terbesar, yaitu 39,73%, terhadap variasi total respon. Nilai F-hitung sebesar 1,40 dengan P-value sebesar 0,416, yang masih lebih besar dari 0,05, menunjukkan bahwa pengaruh parameter T tidak signifikan secara statistik. Namun demikian, dibandingkan dengan parameter lainnya, parameter T dapat dinyatakan sebagai faktor paling dominan dalam memengaruhi respon penelitian, sehingga memiliki peran penting dalam penentuan kondisi proses yang optimal.

Sementara itu, kontribusi error sebesar 28,33% menunjukkan bahwa masih terdapat pengaruh faktor lain di luar parameter yang diteliti yang turut memengaruhi variasi respon. Faktor-faktor tersebut diduga meliputi fluktuasi temperatur selama proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW), ketidakseragaman material aluminium AA5083, serta variasi kondisi eksperimental dan ketelitian pengukuran. Besarnya kontribusi error ini mengindikasikan bahwa kompleksitas proses UFSW melibatkan banyak variabel yang saling berinteraksi dan tidak seluruhnya dapat dikendalikan dalam penelitian ini.

2. Analisis General Linear Model (ANOVA) Terhadap Regangan

Tabel 3.2 Analysis of variance regangan

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
N	2	0,000097	35,16%	0,000097	0,000048	9,59	0,094
WS	2	0,000054	19,57%	0,000054	0,000027	5,34	0,158
T	2	0,000115	41,60%	0,000115	0,000057	11,35	0,081
Error	2	0,000010	3,67%	0,000010	0,000005		
Total	8	0,000276	100,00%				

Parameter N memberikan kontribusi sebesar 35,16% terhadap variasi total respon. Nilai F-hitung sebesar 9,59 dengan P-value sebesar 0,094, yang masih lebih besar dari tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$, menunjukkan bahwa secara statistik parameter N belum berpengaruh signifikan terhadap respon penelitian. Namun demikian, besarnya kontribusi yang diberikan mengindikasikan bahwa parameter N memiliki pengaruh yang cukup kuat secara praktis dan berpotensi menjadi faktor penting dalam optimasi proses.

Parameter WS (*Welding/Traverse Speed*) memiliki kontribusi sebesar 19,57%, lebih kecil dibandingkan parameter N dan T. Nilai F-hitung sebesar 5,34 dengan P-value sebesar 0,158 $> 0,05$ menunjukkan bahwa variasi WS tidak berpengaruh signifikan secara statistik terhadap respon. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan kecepatan pengelasan dalam rentang penelitian hanya memberikan pengaruh moderat terhadap variasi hasil.

Parameter T merupakan faktor dengan kontribusi terbesar, yaitu 41,60% terhadap variasi total respon. Nilai F-hitung sebesar 11,35 dengan P-value sebesar 0,081, meskipun masih lebih besar dari 0,05, menunjukkan bahwa parameter T memiliki pengaruh paling dominan dibandingkan parameter lainnya dan mendekati signifikan secara

statistik. Kondisi ini mengindikasikan bahwa parameter T sangat berperan dalam mengendalikan respon mekanik, khususnya terkait perilaku regangan dan deformasi plastis sambungan.

Sementara itu, kontribusi error sebesar 3,67% menunjukkan bahwa variasi respon yang berasal dari faktor di luar parameter penelitian relatif kecil. Hal ini menandakan bahwa rancangan eksperimen telah cukup baik dalam mengendalikan variabel, serta hasil pengujian memiliki tingkat keandalan yang tinggi.

3. Nilai F-Hitung

- Langkah pertama adalah menentukan taraf signifikansi (α). Dalam penelitian eksperimen dan teknik, taraf signifikansi yang umum digunakan adalah $\alpha = 0,05$ (5%). Nilai ini menunjukkan tingkat kesalahan yang masih dapat ditoleransi dalam pengambilan keputusan statistik.
- Langkah kedua adalah menentukan derajat bebas pembilang (df_1). Nilai df_1 diperoleh dari derajat bebas faktor perlakuan pada tabel ANOVA. Berdasarkan hasil analisis ANOVA, setiap faktor (N, WS, dan T) memiliki $DF = 2$, sehingga $df_1 = 2$.
- Langkah ketiga adalah menentukan derajat bebas penyebut (df_2). Nilai df_2 diambil dari derajat bebas galat (Error) pada tabel ANOVA. Dari hasil analisis, diketahui bahwa $DF \text{ Error} = 2$, sehingga $df_2 = 2$.
- Langkah keempat adalah mencari nilai F tabel pada tabel distribusi F. Pencarian dilakukan pada tabel F dengan menggunakan taraf signifikansi $\alpha = 0,05$, $df_1 = 2$, dan $df_2 = 2$. Dari tabel distribusi F tersebut diperoleh nilai $F_{0.05}(2,2) = 19,00$.
- Langkah terakhir adalah membandingkan nilai F hitung dengan F tabel. Jika F hitung $<$ F tabel, maka hipotesis nol (H_0) diterima. Sebaliknya, jika F hitung $\geq$ F tabel, maka hipotesis nol ditolak. Pada hasil penelitian ini, seluruh nilai F hitung lebih kecil dari nilai F tabel (19,00), sehingga dapat disimpulkan bahwa faktor N, WS, dan T tidak berpengaruh signifikan terhadap variabel respon.

Tabel 3.3 Perhitungan Nilai F-Hitung Pengaruh Parameter Proses UFSW terhadap Kekuatan Tarik Sambungan

No	Parameter Proses	DF	Adj MS Faktor	Adj MS Error	F-Hitung	F-Tabel ($\alpha = 0,05$)	Keputusan
1	Kecepatan Putar Tool (N)	2	37,98	92,52	0,41	19,00	Ho Diterima
2	Kecepatan Pengelasan (WS)	2	66,36	92,52	0,72	19,00	Ho Diterima
3	Temperatur Media Pendingin (T)	2	129,76	92,52	1,40	19,00	Ho Diterima

Berdasarkan Tabel 4.5, seluruh parameter proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) memiliki nilai F-hitung yang lebih kecil dibandingkan nilai F-tabel pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Hal ini menunjukkan bahwa secara statistik variasi kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan, dan temperatur media pendingin tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan aluminium AA5083. Meskipun demikian, parameter temperatur media pendingin memiliki nilai F-hitung paling tinggi, yang mengindikasikan kecenderungan sebagai faktor dominan secara fisik dalam memengaruhi respon kekuatan tarik.

Nilai F-tabel ditentukan pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ dengan derajat bebas pembilang $df_1 = 2$ dan derajat bebas penyebut $df_2 = 2$, sehingga diperoleh nilai F-tabel sebesar 19,00. Nilai F-hitung dari masing-masing parameter proses dibandingkan dengan nilai F-tabel tersebut untuk menentukan signifikansi pengaruh parameter terhadap respon pengelasan.

6. Hipotesis Penelitian

Hipotesis penelitian disusun untuk menjelaskan dugaan awal mengenai pengaruh variasi parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) terhadap kekuatan tarik sambungan dan karakteristik mikrostruktur aluminium AA5083. Pengujian hipotesis dilakukan menggunakan metode *Analysis of Variance* (ANOVA) dengan membandingkan nilai F-hitung terhadap F-tabel pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$.

- **H₀₁ (Hipotesis Nol)**

Variasi parameter proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan aluminium AA5083.

- **H₁₁ (Hipotesis Alternatif)**

Variasi parameter proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan aluminium AA5083.

- **H₀₂ (Hipotesis Nol)**

Variasi parameter proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) tidak berpengaruh signifikan terhadap karakteristik mikrostruktur sambungan aluminium AA5083.

- **H₁₂ (Hipotesis Alternatif)**

Variasi parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) berpengaruh signifikan terhadap karakteristik mikrostruktur sambungan aluminium AA5083.

Berdasarkan hasil pengujian hipotesis menggunakan analisis statistik ANOVA, diperoleh bahwa seluruh nilai F-hitung dari parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) lebih kecil dibandingkan nilai F-tabel pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Hal ini menunjukkan bahwa secara statistik variasi parameter proses UFSW tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan aluminium AA5083. Dengan demikian, hipotesis nol (H_{01}) yang menyatakan bahwa parameter proses UFSW tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan diterima, sedangkan hipotesis alternatif (H_{11}) ditolak.

Meskipun hasil uji statistik menunjukkan tidak adanya pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik, hasil pengamatan mikrostruktur menunjukkan adanya perbedaan karakteristik mikrostruktur akibat variasi parameter proses UFSW. Perbedaan tersebut meliputi perubahan ukuran butir, tingkat homogenitas struktur pada zona sambungan, serta variasi mekanisme patahan yang diamati pada permukaan patahan spesimen. Oleh karena itu, secara metalurgi dapat dinyatakan bahwa variasi parameter proses UFSW tetap memberikan pengaruh terhadap mikrostruktur sambungan aluminium AA5083. Dengan demikian, hipotesis nol (H_{02}) yang menyatakan bahwa parameter proses UFSW tidak berpengaruh terhadap mikrostruktur ditolak secara fisik, sedangkan hipotesis alternatif (H_{12}) diterima berdasarkan analisis deskriptif mikrostruktur, meskipun pengaruh tersebut belum signifikan secara statistik akibat keterbatasan jumlah sampel dan rancangan eksperimen yang digunakan.

VII. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) terhadap kekuatan tarik dan mikrostruktur sambungan aluminium AA5083, dapat disimpulkan bahwa variasi parameter proses berupa kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan tool, serta temperatur media pendingin air memberikan pengaruh terhadap kualitas sambungan secara mekanik dan metalurgi. Nilai kekuatan tarik sambungan hasil UFSW berada pada rentang sekitar 104,83 MPa hingga 175,06 MPa, dengan nilai maksimum diperoleh pada kombinasi parameter yang menghasilkan keseimbangan antara pembangkitan panas dan pendinginan oleh media air, sehingga aliran material plastis dan ikatan metalurgi pada zona adukan dapat terbentuk secara optimal. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa parameter proses yang lebih optimal menghasilkan struktur butir yang lebih halus dan homogen pada zona nugget, TMAZ, dan HAZ akibat terjadinya rekristalisasi dinamis yang intens dan penekanan pertumbuhan butir oleh pendinginan air. Analisis patahan menunjukkan bahwa sambungan dengan parameter optimal didominasi mekanisme patahan ulet, sedangkan parameter yang kurang optimal cenderung menghasilkan mikrostruktur kasar dan sifat mekanik yang lebih rendah. Hasil analisis statistik menggunakan metode Taguchi dan ANOVA menunjukkan bahwa secara statistik variasi parameter proses belum memberikan pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik pada taraf signifikansi 5%, namun secara fisik parameter temperatur media pendingin memiliki kontribusi paling dominan terhadap variasi respon. Dengan demikian, pemilihan parameter proses UFSW yang tepat sangat penting untuk menghasilkan sambungan aluminium AA5083 dengan kualitas mekanik dan mikrostruktur yang optimal, serta media pendingin air terbukti efektif dalam mengendalikan masukan panas dan memperbaiki karakteristik mikrostruktur sambungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Dr. Mulyadi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, serta ilmu pengetahuan selama proses penyusunan skripsi ini. Dengan kesabaran dan dedikasi beliau, penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan skripsi ini dengan baik. Selain itu, penulis juga menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada kedua orang tua tercinta atas doa, kasih sayang, dukungan moral dan materi, serta motivasi yang tiada henti selama menempuh pendidikan hingga penyusunan skripsi ini. Semoga segala kebaikan dan pengorbanan yang telah diberikan mendapatkan balasan terbaik dari Allah SWT dan menjadi amal jariyah yang bermanfaat bagi penulis di masa yang akan datang.

REFERENSI

- [1] M. Sarifudin and P. H. Tjahjanti, "Karakteristik Pengelasan Shield Metal Arc Welding (SMAW) dan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) pada Plat Stainless Steel 201 di Tabung Air Minum," *Innov. Technol. Methodical Res. J.*, vol. 3, no. 1, p. 10, 2024.
- [2] S. T. Mulyadi and I. Iswanto, "Teknologi Pengelasan," 2020, *Umsida Press*.
- [3] G. Nursafitri, A. Dwi, and N. Indriawan, "Mini Review : Analysis of The Influence of Work Environment on SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Results," vol. 23, no. 1, 2025.
- [4] H. S. Abadi *et al.*, "Pengaruh Variasi Sudut Kampuh dan Kuat Arus Pengelasan Hasil Las SMAW Baja SS400 untuk Bahan Bejana Tekan terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan Politeknik Negeri Malang , Indonesia Arus SMAW terhadap Kekuatan Tarik dan Impak Baja Konstruksi IWF JIS G3101 SS400 ", vol. 2, no. 5,

- 2024.
- [5] A. S. Budi and M. Mulyadi, "Simulation of Friction Stir Welding Process Temperature Distribution on AA6061-T6 Material Static Position: Simulasi Distribusi Suhu Proses Friction Stir Welding pada Material AA6061-T6 Posisi Statis," *Indones. J. Innov. Stud.*, vol. 13, pp. 10–21070, 2021.
 - [6] H. Zhang and H. Liu, "Characteristics and Formation Mechanisms of Welding Defects in Underwater Friction Stir Welded Aluminum Alloy," *Metallogr. Microstruct. Anal.*, vol. 1, no. 6, pp. 269–281, 2012, doi: 10.1007/s13632-012-0038-4.
 - [7] R. Silalahi, D. Prayitno, and S. Annas, "Studi Friction Stir Welding (Fsw) Pada Lembaran Al 5083 Dan Al 6061," *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 9, no. 2, p. 2023, 2023, [Online]. Available: <http://ejournal2.uika-bogor.ac.id/index.php/ame/index>
 - [8] C. H. Chien, W. B. Lin, and T. Chen, "Optimal FSW process parameters for aluminum alloys AA5083," in *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A*, Taylor and Francis Ltd., 2011, pp. 99–105. doi: 10.1080/02533839.2011.553024.
 - [9] B. T. Pengelasan, U. Friction, and S. Welding, *Teknologi Pengelasan Underwater Friction Stir Welding : Teori , Praktik , dan Aplikasi pada Material Aluminum Alloy*.
 - [10] M. A. I. Muslim and I. Iswanto, "Effect of Welding Parameters on Friction Stir Welding on the Mechanical Properties of Polyethylene Type Polymers: Pengaruh Parameter Pengelasan Pada Friction Stir Welding Terhadap Sifat Mekanik Polimer Jenis Polyethylene," 2023.
 - [11] R. Padmanaban, V. Ratna Kishore, and V. Balusamy, "Numerical simulation of temperature distribution and material flow during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys," *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 854–863, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.360.
 - [12] D. H. Ahmed and R. Y. Oraby, "Review of Underwater Friction Stir Welding : Analysis of Joint Mechanical and Microstructure , Properties and Process Modeling," pp. 18–21, doi: 10.31031/EME.2024.05.000614.
 - [13] *Structure and Properties of Aluminium Alloys*.
 - [14] D. M. Fouad, W. H. El-garaihy, M. M. Z. Ahmed, I. Albaijan, M. M. E. Selem, and H. G. Salem, "Multi-Channel Spiral Twist Extruded AA5083," pp. 1–19, 2021.
 - [15] Y. Zhao, Q. Lu, Q. Wang, D. Li, F. Li, and Y. Luo, "Corrosion Behavior of Homogenized and Extruded 1100 Aluminum Alloy in Acidic Salt Spray," 2024.
 - [16] A. K. Jassim and R. K. Al-Subar, "Studying the Possibility to Weld AA1100 Aluminum Alloy by Friction Stir Spot Welding," *Int. J. Mater. Metall. Eng.*, vol. 11, no. 9, p. 660, 2017, doi: 10.5281/zenodo.1132443.
 - [17] J. Kumar, S. Majumder, A. K. Mondal, and R. K. Verma, "Influence of rotation speed, transverse speed, and pin length during underwater friction stir welding (UW-FSW) on aluminum AA6063: A novel criterion for parametric control," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 5, no. 3, pp. 295–305, 2022, doi: 10.1016/j.ijlmm.2022.03.001.
 - [18] M. F. Subkhan and M. Mulyadi, "Confirmation Experiment of Friction Stir Welding Process on Aluminum Alloy Aa-6061-T6561 on Tensile Strength and Weld Penetration: Eksperimen Konfirmasi Proses Friction Stir Welding pada Material Alumunium Alloy Aa-6061-T6561 Terhadap Kekuatan Tarik dan Penetrasi Las".
 - [19] B. Istrate and B. Sbarcea, "Correlation between Mechanical Properties — Structural Characteristics and Cavitation Resistance of Rolled Aluminum," 2023.
 - [20] F. O. Dayera, Musa Bundaris Palungan, "G-Tech : Jurnal Teknologi Terapan," *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 8, no. 1, pp. 186–195, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal.uniramalang.ac.id/index.php/g-tech/article/view/1823/1229>
 - [21] Iswanto, P. H. Tjahjanti, Mulyadi, and M. Baiturrohman, "Optimizing tool angle and feeding motion to reduce wear in lathe machining: Experimental findings," in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2024, p. 40017.
 - [22] M. A. Rozzaq, M. Mulyadi, M. I. Mauliana, R. Firdaus, and M. I. Khamidovna, "Comparing mesh models for optimal FSW process temperature," in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2026, p. 40029.
 - [23] Y. N. Zhang, X. Cao, S. Larose, and P. Wanjara, "Review of tools for friction stir welding and processing," *Can. Metall. Q.*, vol. 51, no. 3, pp. 250–261, 2012, doi: 10.1179/1879139512Y.0000000015.
 - [24] M. H. Firmansyah and I. Iswanto, "Influence of Parameters on The Mechanical Strength of Friction Stir Welding in High Density Polyethylene: Pengaruh Parameter terhadap Kekuatan Mekanik Pengelasan Friction Stir Welding pada High Density Polyethylene," 2024.
 - [25] B. Prabandono, A. P. Kartika Santosa, D. P. Ardani, A. Kurniawan, and M. Yusuf, "Analisis Pengujian Tarik dan Sebaran unsur pada Pengelasan Aluminium – Mild Steel menggunakan Metode Cold Metal," *Quantum Tek. J. Tek. Mesin Terap.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2022, doi: 10.18196/jqt.v4i1.16092.
 - [26] R. Pippan, S. Wurster, and D. Kiener, "Fracture mechanics of micro samples: Fundamental considerations," *Mater. Des.*, vol. 159, pp. 252–267, doi: 10.1016/j.matdes.2018.09.004.

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.