

# Artikel Andi.pdf

*by* Turnitin .

---

**Submission date:** 29-Jan-2026 11:48PM (UTC+0900)

**Submission ID:** 2866270033

**File name:** Artikel\_Andi.pdf (739.75K)

**Word count:** 7677

**Character count:** 49817

2  
**Pengaruh Parameter Proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) pada Aluminium AA5083 terhadap Kekuatan Tarik Sambungan dan Mikrostruktur**

<sup>1</sup> Andi Fathurrahman Said<sup>1</sup>, <sup>2</sup> Mulyadi<sup>2</sup>  
E-mail: fathurrahmansaid02@gmail.com<sup>1</sup>, mulyadi@umsida.ac.id<sup>2</sup>

Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

**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(3<sup>4</sup>) 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.

**Keyword:** 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(3<sup>4</sup>), 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 salah satu proses manufaktur yang banyak digunakan untuk menyatukan material logam secara permanen sehingga terbentuk suatu struktur yang kokoh dan berfungsi secara optimal [1]. Mutu sambungan las sangat berpengaruh terhadap keandalan struktur karena area sambungan umumnya menjadi bagian yang paling rentan terhadap beban mekanik maupun pengaruh lingkungan [2]. Pada aplikasi industri, sambungan las diharapkan memiliki kekuatan mekanik yang tinggi, kestabilan dimensi yang baik [3], serta karakteristik mikrostruktur yang mendukung performa jangka panjang dan ketahanan terhadap degradasi material [4].

Paduan aluminium широко digunakan dalam berbagai aplikasi teknik karena memiliki massa jenis yang rendah, ketahanan korosi yang baik, serta kemudahan dalam proses fabrikasi. Akan tetapi, konduktivitas termal yang tinggi dan titik leleh yang relatif rendah menyebabkan aluminium rentan mengalami penurunan sifat mekanik pada proses pengelasan berbasis peleburan [5][6]. Oleh karena itu, teknik pengelasan keadaan padat seperti *Friction Stir Welding* (FSW) menjadi solusi alternatif yang prospektif, karena mampu membentuk sambungan berkualitas tanpa mencairkan logam dasar, sehingga potensi terjadinya cacat las dan distorsi akibat panas dapat ditekan [7].

Pengembangan lebih lanjut dari metode FSW adalah *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) [8], yaitu proses pengelasan yang dilakukan dalam media air untuk mengontrol masukan panas secara lebih efektif [9][10].

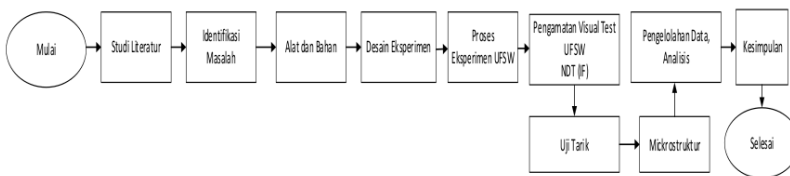
Kondisi pendinginan yang lebih intens pada UFSW dapat menghambat pertumbuhan butir, mengurangi lebar zona terpengaruh panas, serta menjaga kestabilan karakteristik mikrostruktur pada sambungan las [11]. Oleh karena itu, teknik ini dinilai sangat menjanjikan untuk pengelasan material yang sensitif terhadap panas, khususnya paduan aluminium [12].

Aluminium AA5083 merupakan paduan seri 5000 berbasis magnesium yang dikenal memiliki kekuatan mekanik dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan aluminium murni AA1100 maupun paduan ekstrusi AA6063 [13][14][15]. Aluminium AA1100 termasuk paduan seri 1000 dengan kemurnian tinggi yang menunjukkan konduktivitas listrik serta ketahanan korosi yang sangat baik, namun memiliki kekuatan mekanik yang relatif rendah. Oleh karena itu, paduan ini umumnya digunakan pada aplikasi non-struktural seperti panel, tangki kimia ringan, dan komponen dekoratif [16]. Sebaliknya, aluminium AA6063 merupakan paduan seri 6000 berbasis magnesium dan silikon yang memiliki kemampuan ekstrudabilitas sangat baik dengan sifat mekanik tingkat menengah, sehingga banyak dimanfaatkan pada profil konstruksi, rangka bangunan, dan elemen arsitektural [17][18]. Dibandingkan dengan AA1100 dan AA6063, AA5083 menunjukkan kekuatan tarik yang lebih tinggi serta ketahanan yang unggul terhadap lingkungan laut, sehingga sering digunakan pada aplikasi struktural berat seperti badan kapal, struktur lepas pantai, dan tangki kriogenik [19]. Namun, karena termasuk paduan non-*heat treatable*, sifat mekanik AA5083 sangat dipengaruhi oleh masukan panas selama proses pengelasan. Hal ini menjadikan pemilihan metode dan parameter pengelasan lebih kritis dibandingkan pada AA1100 dan AA6063 [20].

Sampai saat ini, studi mengenai UFSW masih lebih banyak dilakukan pada paduan aluminium lain, sedangkan penelitian yang secara spesifik membahas paduan AA5083 masih relatif terbatas [21]. Padahal, AA5083 memiliki karakteristik termomekanik yang berbeda, sehingga respons material ini terhadap variasi parameter proses UFSW tidak dapat disamakan dengan paduan aluminium lainnya [22]. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter proses UFSW terhadap sifat mekanik dan karakteristik mikrostruktur sambungan aluminium AA5083. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam penentuan parameter proses yang optimal, serta memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan teknologi pengelasan keadaan padat pada material aluminium untuk aplikasi industri.

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah disampaikan, penelitian ini diarahkan untuk menjawab dua permasalahan utama, yaitu: (1) bagaimana pengaruh parameter proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) terhadap kekuatan tarik sambungan aluminium AA5083, serta (2) bagaimana pengaruh parameter proses UFSW terhadap karakteristik mikrostruktur sambungan yang terbentuk. Parameter proses yang dianalisis meliputi kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan (*welding speed*), sudut kemiringan tool, dan kedalaman penetrasi. Parameter-parameter tersebut berperan penting dalam menentukan besarnya masukan panas, mekanisme aliran material plastis, serta evolusi mikrostruktur pada zona sambungan las.

## II. METODE



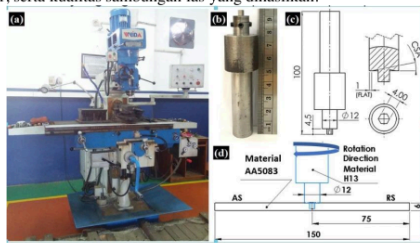
**Gambar 2.1** Flowchart Kegiatan

Flowchart pada gambar menggambarkan tahapan metodologi penelitian yang diawali dengan studi literatur untuk memperoleh landasan teori dan referensi terkait proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) serta sifat material yang diteliti, dilanjutkan dengan identifikasi masalah guna menentukan fokus dan tujuan penelitian serta penentuan alat dan bahan eksperimen. Tahap berikutnya adalah perancangan desain eksperimen yang mencakup penentuan parameter proses dan spesimen uji, kemudian pelaksanaan proses pengelasan UFSW sesuai parameter yang telah dirancang. Setelah pengelasan, dilakukan pengamatan visual dan pengujian non-destruktif (NDT) untuk mengevaluasi kualitas awal sambungan, diikuti dengan pengujian tarik untuk menentukan sifat mekanik serta analisis mikrostruktur untuk mengamati perubahan struktur butir pada daerah las. Seluruh data hasil pengujian selanjutnya diolah dan dianalisis untuk mengkaji hubungan antara parameter proses, mikrostruktur, dan sifat mekanik sambungan, yang kemudian digunakan sebagai dasar penarikan kesimpulan penelitian.

- a. **Literature Review.** Tahap awal penelitian dilakukan melalui kajian literatur secara komprehensif mengenai proses *friction stir welding* (FSW) pada material aluminium dan komposit berbasis aluminium, khususnya paduan AA6061 yang diperkuat partikel SiC. Kajian ini bertujuan untuk memahami pengaruh parameter proses, seperti kecepatan rotasi tool, kecepatan pengelasan, serta fraksi penguat SiC, terhadap karakteristik mikrostruktur, sifat mekanik, dan kualitas permukaan sambungan las. Selain itu, penelitian terdahulu yang membahas metode optimasi parameter proses,

termasuk pendekatan statistik dan *machine learning*, turut dianalisis untuk memperoleh wawasan mengenai teknik prediksi dan peningkatan performa sambungan las. Hasil studi literatur ini diharapkan menjadi landasan ilmiah yang kuat dalam perancangan eksperimen serta interpretasi hasil penelitian.

- b. Identifikasi Masalah. Tahap identifikasi masalah dilakukan untuk merumuskan permasalahan utama berdasarkan kondisi aktual serta kesenjangan pengetahuan yang masih ada dalam penelitian. Pada studi *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) pada aluminium AA5083, permasalahan yang diidentifikasi mencakup keterbatasan informasi mengenai pengaruh parameter proses, khususnya kecepatan putar tool dan kecepatan pengelasan, terhadap kekuatan tarik sambungan, pengaruh media pendinginan air terhadap evolusi mikrostruktur hasil pengelasan, serta belum optimalnya desain dan material tool yang digunakan (tool H13). Identifikasi permasalahan ini menjadi dasar dalam penetapan fokus penelitian dan perumusan tujuan penelitian secara sistematis dan terarah.
- c. Persiapan Alat dan Bahan. Mesin milling digunakan sebagai peralatan utama dalam pelaksanaan eksperimen, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2(a), karena mampu menyediakan gerak rotasi pada tool serta gerak translasi sepanjang garis sambungan secara terkontrol. Mesin ini memungkinkan pengaturan parameter proses, seperti kecepatan putar spindle, kecepatan pengelasan, dan kedalaman penetrasi tool, dengan tingkat presisi yang tinggi. Selain itu, struktur mesin yang kaku memberikan stabilitas selama proses pengelasan, sehingga getaran dapat diminimalkan dan kualitas sambungan yang dihasilkan menjadi lebih konsisten. Dalam penelitian ini, mesin milling dimodifikasi dengan sistem penjepit spesimen serta media pendingin berbasis air untuk mendukung pelaksanaan proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) pada aluminium AA5083, seperti ditunjukkan pada Gambar 2(d). Tool UFSW dirancang secara khusus untuk menghasilkan aliran material plastis yang stabil serta mampu menahan beban mekanik dan termal selama proses pengelasan. Tool ini terdiri dari shoulder berbentuk silinder datar dengan diameter sekitar 12 mm yang berfungsi sebagai sumber panas akibat gesekan sekaligus penahan material plastis, serta pin berbentuk heksagonal dengan panjang 4 mm dan diameter 4 mm yang berperan dalam proses pengadukan material hingga terbentuk ikatan metalurgi yang kuat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2(b) dan (c). Material tool menggunakan baja perkakas H13 yang memiliki ketahanan tinggi terhadap temperatur dan keausan, sehingga cocok untuk aplikasi pengelasan bawah air. Arah rotasi tool ditetapkan searah jarum jam dengan penentuan sisi *advancing side* (AS) dan *retreating side* (RS), yang memengaruhi pola aliran material, evolusi mikrostruktur, serta kualitas sambungan las yang dihasilkan.



**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, dirumuskan rancangan eksperimen yang mencakup pemilihan material serta penetapan parameter proses, antara lain kecepatan rotasi tool, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan tool, dan suhu media pendingin air, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.1 [23]. Selain itu, dirancang pula perangkat pendukung khusus untuk pelaksanaan proses UFSW di dalam media air. Desain pengelasan melibatkan seluruh variabel yang akan diuji, sebagaimana 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 eksperimen dilakukan dengan tiga kali pengulangan, tahap prediksi menggunakan pendekatan Taguchi dilakukan 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. Tahap pelaksanaan eksperimen diawali dengan penyiapan spesimen aluminium AA5083 yang akan disambung menggunakan metode *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.3 Proses pengelasan dilakukan pada mesin milling yang telah dimodifikasi dengan sistem pendingin berbasis air. Tool berbahan H13 dipasang pada spindle dengan sudut kemiringan yang telah ditentukan, kemudian parameter proses, seperti kecepatan rotasi tool dan kecepatan pengelasan, diatur sesuai dengan rancangan eksperimen. Selama proses berlangsung, tool berputar dan bergerak translasi sepanjang garis sambungan untuk menghasilkan pengadukan material plastis, sehingga terbentuk sambungan las yang kontinu dan terikat secara metalurgi.



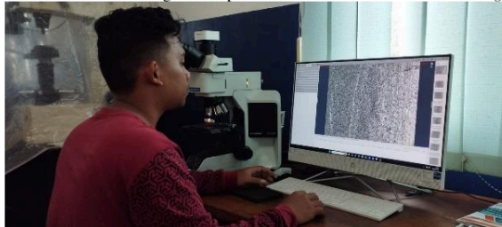
**Gambar 2.3** Model pelaksanaan eksperimen

- f. Pengujian dan Analisis. Tahap pengujian dan analisis dilakukan untuk mengevaluasi kualitas sambungan yang dihasilkan dari proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW). Pengujian mekanik dilakukan melalui uji tarik untuk menentukan nilai kekuatan tarik maksimum, tegangan luluh, serta regangan patah. Selanjutnya, analisis mikrostruktur dilakukan menggunakan teknik metalografi untuk mengamati perubahan struktur butir pada zona *weld nugget* (WN), *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ), *heat affected zone* (HAZ), dan *base metal* (BM). Seluruh data hasil pengujian kemudian diolah dan dianalisis secara kuantitatif maupun kualitatif guna mengkaji hubungan antara parameter proses pengelasan dengan karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik sambungan las.
- g. Analisis Data. Data hasil eksperimen dianalisis untuk mengkaji keterkaitan antara parameter proses UFSW dan kualitas sambungan aluminium AA5083 yang dihasilkan. Evaluasi dilakukan berdasarkan karakteristik makrostruktur sambungan, nilai kekuatan tarik, serta karakteristik mikrostruktur pada zona *weld nugget* (WN), *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ), *heat affected zone* (HAZ), dan *base metal* (BM). Hasil analisis ini selanjutnya digunakan untuk menentukan kombinasi parameter proses yang paling optimal dalam menghasilkan sambungan dengan performa mekanik yang tinggi 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 sekitar  $\pm 100$  kN, yang umum digunakan untuk pengujian tarik material logam di laboratorium teknik mesin [24]. Pembebanan diberikan secara bertahap dan kontinu melalui sistem hidrolik hingga spesimen mengalami kegagalan. Mesin uji tarik dilengkapi dengan rahang penjepit atas dan bawah, rangka baja yang kaku, serta panel indikator analog-digital untuk menampilkan nilai beban tarik selama pengujian [25]. Spesimen dipasang sejajar dengan sumbu pembebanan untuk memastikan gaya tarik bekerja secara aksial dan merata. Pengujian dilakukan mengacu pada standar ASTM E8/E8M, dan nilai beban tarik maksimum yang diperoleh dicatat sebagai kekuatan tarik sambungan hasil proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW).



**Gambar 2.5** Pengamatan mikrostruktur

Metalografi merupakan teknik 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 memberikan informasi penting mengenai ukuran dan morfologi butir, distribusi fasa, serta keberadaan cacat seperti porositas, inklusi, dan retak mikro. Struktur mikro dipengaruhi oleh proses manufaktur, perlakuan panas, serta kondisi pembebanan mekanik yang dialami material. Ukuran dan distribusi butir berperan signifikan terhadap sifat mekanik, di mana butir halus umumnya meningkatkan kekuatan dan kekerasan, sedangkan butir kasar cenderung meningkatkan keuletan namun menurunkan kekuatan. Selain itu, metalografi juga digunakan untuk mengidentifikasi zona mikrostruktur yang berbeda, seperti daerah yang mengalami deformasi plastis, zona terpengaruh panas, dan 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, pengendalian kualitas industri, dan analisis kegagalan material.

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

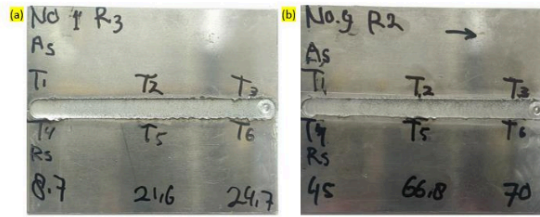
#### A. Hasil Penelitian *Underwater friction stir welding* (UFSW)

Proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) pada aluminium AA5083 dilaksanakan berdasarkan desain eksperimen Taguchi *Orthogonal Array* L9 ( $3^4$ ), sebagaimana dijelaskan pada Bab II. Variasi parameter utama yang dikaji meliputi kecepatan putar tool (*rotational speed*) dan kecepatan penggeseran atau waktu pengadukan (*sliding speed/dwell time*), sedangkan parameter lainnya, seperti material tool H13, kedalaman penetrasi, tekanan plunge, dan sistem penjepitan spesimen, dipertahankan konstan selama proses pengelasan.

Hasil proses UFSW ditunjukkan melalui tiga spesimen representatif (No.1 R3 dan No.9 R2) yang ditampilkan pada Gambar 3.1, di mana masing-masing spesimen telah diberi penandaan *advancing side* (AS), *retreating side* (RS), serta titik pengamatan T1–T6 sepanjang jalur sambungan. Ketiga spesimen tersebut menunjukkan sambungan yang terbentuk secara kontinu tanpa adanya cacat makroskopik yang signifikan, seperti *burn-through*, retak terbuka,



maupun kegagalan sambungan awal. Temuan ini mengindikasikan bahwa rentang parameter proses yang diterapkan masih berada dalam batas operasional yang aman untuk pengelasan UFSW pada aluminium AA5083.

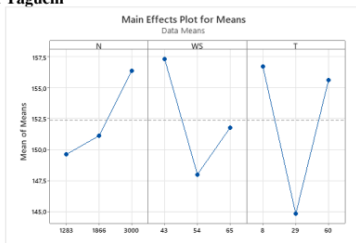


**Gambar 3.1** Hasil pengelasan UFSW eksperimen

Berdasarkan rancangan eksperimen Taguchi yang terdiri atas sembilan percobaan, diperoleh variasi kualitas sambungan las yang berbeda, baik dari segi karakteristik makro, keberadaan cacat, maupun sifat mekanik yang dihasilkan. Untuk analisis lebih mendalam, dipilih dua spesimen yang merepresentasikan kondisi ekstrem, yaitu spesimen dengan performa minimum dan maksimum. Spesimen nomor 9 ditetapkan sebagai kondisi minimum karena menunjukkan respons performa terendah, sedangkan spesimen nomor 1 replikasi R3 dipilih sebagai kondisi maksimum dengan nilai respons tertinggi berdasarkan hasil pengujian pada tabel eksperimen. Pemilihan kedua spesimen tersebut bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh parameter proses UFSW terhadap kualitas sambungan, termasuk pembentukan struktur makro, jenis dan distribusi cacat pengelasan, serta keterkaitannya dengan sifat mekanik yang diperoleh.

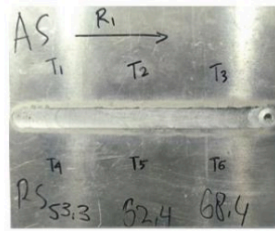
Secara makroskopis, spesimen dengan kondisi maksimum menunjukkan permukaan sambungan yang relatif halus, kontinu, dan bebas dari cacat signifikan seperti *tunnel defect* atau *void*, yang menandakan bahwa aliran material plastis berlangsung secara stabil selama proses pengelasan. Sebaliknya, spesimen dengan kondisi minimum memperlihatkan indikasi cacat makro berupa ketidakteraturan permukaan, pembentukan *flash* yang berlebih, serta potensi terbentuknya rongga internal. Kondisi ini diduga disebabkan oleh kombinasi parameter proses yang kurang optimal sehingga aliran material tidak terjadi secara homogen. Perbedaan karakteristik makro tersebut mengindikasikan bahwa parameter proses UFSW memiliki peran yang sangat 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* menggambarkan pengaruh masing-masing parameter proses terhadap nilai rata-rata respons hasil pengelasan. Pada parameter kecepatan putar tool (N), terlihat kecenderungan peningkatan nilai respons seiring dengan bertambahnya kecepatan rotasi, di mana level tertinggi (3000 rpm) menghasilkan nilai rata-rata respons terbesar. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kecepatan putar meningkatkan masukan panas dan intensitas pengadukan material, sehingga kualitas sambungan menjadi lebih baik. Pada parameter kecepatan pengelasan (WS), level 43 mm/min menunjukkan nilai rata-rata respons tertinggi, sedangkan peningkatan kecepatan pengelasan menyebabkan penurunan nilai respons. Temuan ini menunjukkan bahwa kecepatan pengelasan yang terlalu tinggi mengurangi waktu interaksi antara tool dan material, sehingga masukan panas dan plastisitas material berkurang dan kualitas sambungan menjadi kurang optimal. Sementara itu, pada parameter temperatur media pendingin (T), temperatur 8 °C dan 60 °C menghasilkan nilai respons yang lebih tinggi dibandingkan 29 °C, dengan nilai terendah pada temperatur 29 °C. Hasil ini menunjukkan bahwa kondisi pendinginan air memengaruhi laju pendinginan dan evolusi mikrostruktur, yang selanjutnya berdampak pada sifat mekanik sambungan las.

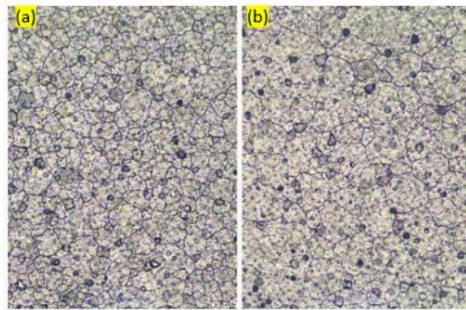


**Gambar 3.3** Hasil pengelasan UFSW validasi

Berdasarkan grafik validasi Taguchi, kombinasi parameter proses yang mendekati kondisi optimal menghasilkan jalur las yang relatif kontinu dan homogen pada permukaan sambungan. Pengamatan makro menunjukkan bahwa jalur pengelasan terbentuk secara stabil sepanjang arah pengelasan, yang mengindikasikan bahwa aliran material plastis berlangsung secara efektif akibat masukan panas dan intensitas pengadukan yang memadai. Permukaan sambungan tampak lebih halus dengan jumlah cacat yang minimal, sehingga menunjukkan bahwa parameter proses yang diterapkan mampu meningkatkan kualitas sambungan yang dihasilkan melalui proses UFSW.

Meskipun demikian, masih terdapat variasi kualitas permukaan pada beberapa segmen sambungan, yang mengindikasikan adanya ketidaksragaman aliran material selama proses pengelasan. Temuan ini sejalan dengan hasil analisis Taguchi yang menunjukkan bahwa perubahan parameter proses, seperti kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan, dan temperatur media pendingin, berpengaruh terhadap distribusi panas serta perilaku deformasi plastis material. Secara umum, hasil pengamatan makro ini menegaskan bahwa kombinasi 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 proses maksimum, hasil pengamatan 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 satuan luas bidang pengamatan ( $N_b$ ). Berdasarkan observasi visual, jumlah butir pada kondisi parameter maksimum diperkirakan lebih tinggi, misalnya berkisar antara 150–250 butir per  $\text{mm}^2$  (estimasi kualitatif berdasarkan perbandingan visual). Temuan ini mengindikasikan bahwa ukuran butir lebih kecil dengan nilai diameter butir rata-rata yang lebih rendah. Kerapatan butir yang tinggi tersebut menunjukkan terjadinya *grain refinement* akibat proses rekristalisasi dinamis yang intens selama pengelasan, sehingga berkontribusi pada peningkatan kekuatan material sesuai dengan hubungan Hall–Petch, di mana penurunan ukuran butir berkorelasi dengan peningkatan kekuatan tarik dan kekerasan material.

Pada kondisi parameter proses minimum, mikrostruktur menunjukkan ukuran butir yang relatif lebih besar dengan jumlah batas butir yang lebih sedikit per satuan luas. Secara kuantitatif, kerapatan butir diperkirakan lebih rendah, misalnya berada pada kisaran 60–120 butir per  $\text{mm}^2$ , yang mengindikasikan terbentuknya struktur mikro berbutir kasar (*coarse grain*). Diameter butir rata-rata pada kondisi ini lebih besar dibandingkan dengan kondisi parameter maksimum, yang menunjukkan bahwa masukan panas dan deformasi plastis yang terjadi belum cukup



untuk memicu rekristalisasi dinamis secara optimal. Kondisi kerapatan butir yang rendah ini berpotensi menyebabkan penurunan kekuatan tarik dan kekerasan material dibandingkan dengan kondisi parameter maksimum.

#### D. Hasil Pengujian Kekuatan Tarik Sambungan

Pengujian tarik dilakukan pada spesimen aluminium AA5083 hasil proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW) menggunakan mesin uji tarik sesuai dengan standar ASTM E8M. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai kekuatan tarik maksimum sambungan serta mengevaluasi pengaruh variasi parameter proses UFSW terhadap performa mekanik sambungan yang dihasilkan. Data pengujian diperoleh dari berbagai kombinasi parameter proses berdasarkan desain eksperimen Taguchi *Orthogonal Array* L9 (3<sup>4</sup>), di mana setiap kombinasi parameter dilakukan pengujian dan replikasi untuk memastikan keandalan dan konsistensi hasil.

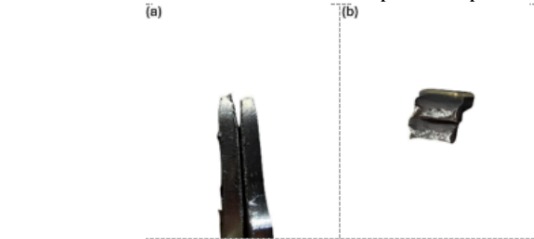
Dalam penelitian ini, replikasi R1 dipilih sebagai data utama untuk analisis lanjutan karena menunjukkan hasil yang paling konsisten dan dianggap paling representatif dibandingkan replikasi lainnya. Berdasarkan hasil pengujian tarik, nilai kekuatan tarik maksimum pada replikasi R1 mencapai 170,16 MPa,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

Secara umum, 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 terendah sebesar 104,83 MPa diperoleh pada kombinasi parameter proses yang menghasilkan masukan panas gesek relatif tidak optimal, sedangkan nilai tertinggi sebesar 175,06 MPa dicapai pada kombinasi parameter yang menunjukkan keseimbangan yang baik antara kecepatan putar tool dan kecepatan penggeseran atau waktu pengadukan. Rentang nilai ini menunjukkan bahwa variasi parameter proses UFSW berpengaruh signifikan terhadap performa mekanik sambungan yang dihasilkan.

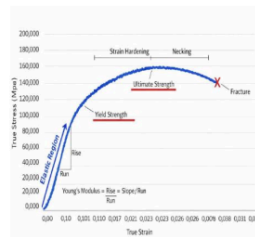
Rentang nilai kekuatan tarik yang relatif lebar ini menunjukkan bahwa variasi parameter proses UFSW memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan sambungan dalam menahan beban tarik. Pada spesimen dengan kekuatan tarik tinggi (mendekati 175 MPa), proses UFSW menghasilkan deformasi plastis yang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

#### D. Analisis Patahan dan Kekuatan Tarik Eksperimen dan Validasi

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



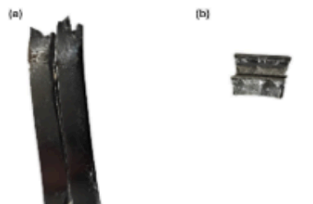
Gambar 3.5 Hasil uji tarik maksimal Spc 1 R3 eksperimen (a)tampak samping, (b) tampak patahan



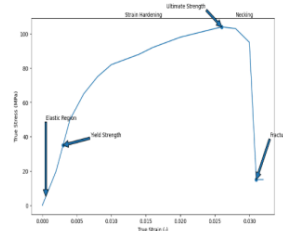
**Gambar 3.6** Grafik uji tarik tegangan maksimal eksperimen

Pada kondisi parameter proses maksimum, kurva uji tarik menunjukkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) yang tinggi, diikuti oleh fase *strain hardening*, *necking*, dan akhirnya *fracture*. Hal ini mengindikasikan bahwa material mampu mengalami deformasi plastis yang signifikan sebelum terjadi kegagalan, yang mencerminkan sifat mekanik sambungan yang baik. Peningkatan kekuatan tarik tersebut berkorelasi dengan mikrostruktur hasil UFSW yang memiliki ukuran butir lebih halus dan kerapatan butir yang tinggi, sehingga pergerakan dislokasi terhambat sesuai dengan mekanisme penguatan Hall-Petch. Pola patahan pada kondisi parameter maksimum menunjukkan karakteristik patahan ulet (*ductile fracture*), yang ditandai oleh adanya deformasi plastis dan penyempitan penampang (*necking*) sebelum patah. Patahan yang bersifat ulet ini menunjukkan bahwa sambungan las memiliki integritas struktural yang baik dan mampu menahan tegangan maksimum sebelum kegagalan terjadi, yang selaras dengan kurva tegangan-regangan yang memperlihatkan fase elastis, plastis, *strain hardening*, hingga tercapainya *ultimate strength* sebelum *fracture*.

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



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



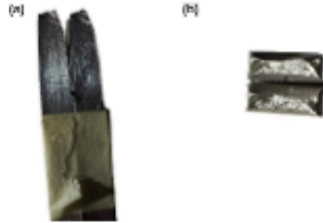
**Gambar 3.8** Grafik uji tarik tegangan minimum eksperimen

Pada kondisi parameter proses minimum, mikrostruktur menunjukkan ukuran butir yang lebih besar (*coarse grain*) dengan kerapatan butir yang lebih rendah dibandingkan kondisi parameter maksimum. Struktur butir yang kasar ini mengindikasikan bahwa masukan panas dan deformasi plastis selama proses UFSW tidak cukup untuk memicu rekristalisasi dinamis secara optimal. Akibatnya, proses *grain refinement* berlangsung terbatas, sehingga jumlah batas butir yang terbentuk lebih sedikit dan jarak antar butir menjadi lebih lebar. Kondisi mikrostruktur tersebut berpengaruh langsung terhadap perilaku tegangan-regangan. Pada kurva uji tarik, kondisi parameter minimum umumnya menunjukkan nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* (UTS) yang lebih rendah serta kemampuan deformasi plastis yang terbatas. Fase *strain hardening* berlangsung lebih singkat dan fenomena *necking* terjadi lebih

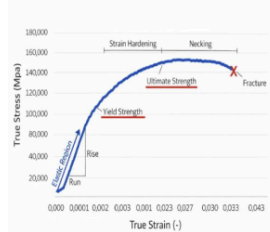
awal, yang menunjukkan bahwa material memiliki ketahanan terhadap deformasi yang lebih rendah dibandingkan kondisi parameter maksimum.

Hasil patahan pada kondisi parameter minimum menunjukkan kecenderungan patahan yang lebih getas (*brittle fracture*) atau deformasi plastis yang relatif terbatas, yang ditandai dengan penyempitan penampang yang kecil serta permukaan patahan yang relatif datar. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sambungan las tidak mampu menahan tegangan tinggi sebelum terjadi kegagalan, yang sejalan dengan nilai *ultimate tensile strength* (UTS) yang lebih rendah pada kurva uji tarik. Fenomena tersebut dikaitkan dengan ukuran butir yang lebih besar, yang menyebabkan jumlah batas butir sebagai penghambat pergerakan dislokasi menjadi lebih sedikit, sehingga kekuatan mekanik material mengalami penurunan.

### 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 proses maksimum, baik pada tahap eksperimen maupun validasi, mikrostruktur yang terbentuk menunjukkan butiran halus (*fine grain*) dengan kerapatan batas butir yang tinggi serta distribusi yang relatif homogen. Karakteristik mikrostruktur ini mengindikasikan terjadinya rekristalisasi dinamis yang intens akibat kombinasi masukan panas yang tinggi dan deformasi plastis yang signifikan selama proses UFSW. Selain itu, pendinginan cepat oleh media air berperan dalam menghambat pertumbuhan butir, sehingga ukuran butir tetap kecil dan rapat pada kedua kondisi. Kesamaan karakter mikrostruktur antara hasil eksperimen dan validasi menunjukkan bahwa parameter proses yang digunakan pada tahap validasi mampu mereplikasi kondisi mikrostruktur hasil eksperimen, sehingga validasi secara mikrostruktural dapat dinyatakan berhasil.

Perbandingan grafik kekuatan tarik maksimum antara hasil eksperimen dan validasi menunjukkan bahwa kurva tegangan-regangan pada kondisi parameter maksimal memiliki pola yang relatif serupa, yang meliputi daerah elastis, titik luluh (*yield point*), fase *strain hardening*, *necking*, hingga terjadinya *fracture*. Nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* (UTS) pada tahap validasi menunjukkan kecenderungan yang mendekati hasil eksperimen, meskipun terdapat perbedaan kecil yang kemungkinan disebabkan oleh variasi kondisi proses pengelasan, heterogenitas material, serta faktor eksperimental seperti kualitas sambungan dan ketelitian pengujian tarik. Kesamaan tren kurva ini mengindikasikan bahwa parameter proses pada tahap validasi mampu mereplikasi perilaku mekanik sambungan las yang diperoleh pada tahap eksperimen, sehingga hasil validasi dapat dianggap konsisten dan digunakan untuk mengonfirmasi parameter optimal pada proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW).

### E. Analisis Statistik Taguchi ANOVA

Analisis statistik dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh serta tingkat signifikansi setiap parameter proses Underwater Friction Stir Welding (UFSW) terhadap kekuatan tarik dan regangan sambungan aluminium AA5083. Pendekatan statistik diterapkan 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) diterapkan untuk menganalisis kontribusi masing-masing parameter proses, seperti kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan

tool, dan kedalam penetrasi. Hasil analisis statistik ini digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi parameter proses yang paling dominan serta menentukan kombinasi parameter yang optimum dalam menghasilkan kualitas sambungan UFSW yang 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 kecepatan putar tool (N) memberikan kontribusi sebesar 11,63% terhadap variasi respons yang diamati. Nilai F-hitung sebesar 0,41 dengan P-value 0,709, yang lebih besar dari tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$ , menunjukkan bahwa variasi parameter N tidak berpengaruh signifikan secara statistik terhadap respons penelitian. Temuan ini mengindikasikan bahwa perubahan kecepatan putar tool dalam rentang yang diuji tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap hasil pengelasan.

Parameter kecepatan pengelasan (*welding/traverse speed*, WS) menunjukkan kontribusi yang lebih besar, yaitu sebesar 20,32%, dibandingkan dengan parameter kecepatan putar tool (N). Namun, nilai F-hitung sebesar 0,72 dan P-value 0,582 yang lebih besar dari tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$  menunjukkan bahwa secara statistik parameter WS belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respons penelitian. Meskipun demikian, nilai kontribusi yang relatif lebih tinggi mengindikasikan bahwa parameter WS mulai berperan dalam memengaruhi variasi respons dan berpotensi menjadi faktor pendukung dalam proses optimasi parameter pengelasan.

Parameter temperatur media pendingin (T) menunjukkan kontribusi terbesar terhadap variasi total respons, yaitu sebesar 39,73%. Nilai F-hitung sebesar 1,40 dengan P-value 0,416 yang lebih besar dari tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$  mengindikasikan bahwa pengaruh parameter T secara statistik belum signifikan. Meskipun demikian, dibandingkan dengan parameter lainnya, parameter T dapat dikategorikan sebagai faktor yang paling dominan dalam memengaruhi respons penelitian, sehingga memiliki peran penting dalam penentuan kondisi proses yang optimal.

Kontribusi galat (*error*) sebesar 28,33% menunjukkan bahwa masih terdapat faktor-faktor lain di luar parameter yang diteliti yang turut memengaruhi variasi respons. Faktor tersebut diduga meliputi fluktuasi temperatur selama proses *Underwater Friction Stir Welding* (UFSW), ketidakseragaman sifat material aluminium AA5083, serta variasi kondisi eksperimental dan ketelitian pengukuran. Nilai kontribusi galat yang cukup besar ini mengindikasikan bahwa proses UFSW memiliki kompleksitas tinggi dengan banyak variabel yang saling berinteraksi, sehingga tidak seluruhnya dapat dikontrol secara penuh 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 kecepatan putar tool (N) memberikan kontribusi sebesar 35,16% terhadap variasi total respons. Nilai F-hitung sebesar 9,59 dengan P-value 0,094, yang masih lebih besar dari tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$ , menunjukkan bahwa secara statistik parameter N belum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respons penelitian. Meskipun demikian, nilai kontribusi yang relatif besar menunjukkan bahwa parameter N memiliki pengaruh praktis yang cukup kuat dan berpotensi menjadi faktor penting dalam proses optimasi parameter pengelasan.

Parameter kecepatan pengelasan (*welding/traverse speed*, WS) menunjukkan kontribusi sebesar 19,57%, lebih kecil dibandingkan parameter N dan temperatur media pendingin (T). Nilai F-hitung sebesar 5,34 dengan P-value 0,158 ( $> 0,05$ ) mengindikasikan bahwa variasi WS tidak berpengaruh signifikan secara statistik terhadap respons. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan kecepatan pengelasan dalam rentang penelitian hanya memberikan pengaruh moderat terhadap variasi hasil yang diperoleh.

Parameter temperatur media pendingin (T) merupakan faktor dengan kontribusi terbesar, yaitu sebesar 41,60% terhadap variasi total respons. Nilai F-hitung sebesar 11,35 dengan P-value 0,081, meskipun masih lebih besar dari 0,05, menunjukkan bahwa parameter T merupakan faktor yang paling dominan dan mendekati signifikan secara statistik dibandingkan parameter lainnya. Kondisi ini mengindikasikan bahwa temperatur media pendingin berperan penting dalam mengendalikan respons 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 ( $\alpha$ ). 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) menunjukkan nilai F-hitung yang lebih kecil dibandingkan nilai F-tabel pada tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$ . Hal ini mengindikasikan bahwa secara statistik variasi kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan, dan temperatur media pendingin tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan aluminium AA5083. Meskipun demikian, parameter temperatur media pendingin memiliki nilai F-hitung yang paling tinggi, sehingga dapat diinterpretasikan sebagai faktor yang paling dominan secara fisik dalam memengaruhi respons 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 masing-masing parameter proses kemudian dibandingkan dengan nilai F-tabel tersebut untuk menentukan signifikansi pengaruh parameter terhadap respons 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  $\alpha = 0,05$ .

#### • $H_{01}$ (Hipotesis Nol)

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

#### • $H_{11}$ (Hipotesis Alternatif)

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

#### • $H_{02}$ (Hipotesis Nol)

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

#### • $H_{12}$ (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.

#### IV. KESIMPULAN

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, meliputi kecepatan putar tool, kecepatan pengelasan, sudut kemiringan tool, dan temperatur media pendingin, memengaruhi kualitas sambungan baik secara mekanik maupun metalurgi. Nilai kekuatan tarik sambungan UFSW berada pada kisaran 104,83 MPa hingga 175,06 MPa, dengan nilai maksimum diperoleh pada kombinasi parameter yang mampu menghasilkan keseimbangan antara pembangkitan panas dan pendinginan oleh media air, sehingga aliran material plastis serta pembentukan ikatan metalurgi pada zona adukan berlangsung 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 serta terhambatnya pertumbuhan butir oleh pendinginan air. Analisis patahan menunjukkan bahwa sambungan dengan parameter optimal didominasi oleh mekanisme patahan ulet, sedangkan kondisi parameter yang kurang optimal cenderung menghasilkan mikrostruktur berbutir 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 menunjukkan kontribusi paling dominan terhadap variasi respons. Oleh karena itu, pemilihan parameter proses UFSW yang tepat sangat penting untuk memperoleh sambungan aluminium AA5083 dengan kualitas mekanik dan mikrostruktur yang optimal, serta penggunaan media pendingin air terbukti efektif dalam mengendalikan masukan panas dan meningkatkan karakteristik mikrostruktur sambungan.

#### 24 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 Aluminium 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.jlmm.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 Aluminium 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. Phippan, 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.

# Artikel Andi.pdf

## ORIGINALITY REPORT

14%

SIMILARITY INDEX

13%

INTERNET SOURCES

10%

PUBLICATIONS

6%

STUDENT PAPERS

## PRIMARY SOURCES

|    |   |     |
|----|---|-----|
| 1  | Submitted to Universitas Muhammadiyah Sidoarjo<br>Student Paper   | 3%  |
| 2  | archive.umsida.ac.id<br>Internet Source   | 1%  |
| 3  | lib.ibs.ac.id<br>Internet Source  | 1%  |
| 4  | www.biorxiv.org<br>Internet Source  | 1%  |
| 5  | ojs.ummometro.ac.id<br>Internet Source  | 1%  |
| 6  | www.ejurnalmalahayati.ac.id<br>Internet Source  | 1%  |
| 7  | Mochammad Yulianto, Mulyadi, A'rasy Fahrudin. "Pengaruh Proses Underwater Friction Stir Welding Terhadap Kekerasan dan Kekasaran pada Paduan Aluminium AA6005-T6: Investigasi Eksperimental", Journal of Aerospace Systems and Engineering Innovations, 2025<br>Publication | <1% |
| 8  | crimsonpublishers.com<br>Internet Source  | <1% |
| 9  | repository.upi.edu<br>Internet Source   | <1% |
| 10 | repository.usd.ac.id<br>Internet Source   | <1% |

|    |  |      |
|----|--|------|
| 11 | Lathifah Indah Cahya Ningrum, Gugup Tugi Prihatma. "The Influence of Compensation, Workload, and Work Stress on Job Satisfaction of Library and Archives Service Employees in Banten Province", Jurnal Akuntansi Manajemen (JAKMEN), 2024<br>Publication | <1 % |
| 12 | docplayer.info<br>Internet Source  | <1 % |
| 13 | repo.undiksha.ac.id<br>Internet Source   | <1 % |
| 14 | 123dok.com<br>Internet Source  | <1 % |
| 15 | Mutmainah Mutmainah. "Hubungan antara Kemampuan Awal Matematika dan Motivasi Kuliah Mahasiswa dengan Hasil Belajar Statistika Dasar", Jurnal Ilmiah Iqra', 2018<br>Publication   | <1 % |
| 16 | text-id.123dok.com<br>Internet Source  | <1 % |
| 17 | www.researchgate.net<br>Internet Source  | <1 % |
| 18 | es.scribd.com<br>Internet Source   | <1 % |
| 19 | ejurnal.itenas.ac.id<br>Internet Source  | <1 % |
| 20 | Submitted to Fakultas Teknik<br>Student Paper  | <1 % |
| 21 | positori.usu.ac.id:8080<br>Internet Source   | <1 % |
| 22 | repository.radenintan.ac.id<br>Internet Source   | <1 % |

|    |   |      |
|----|---|------|
| 23 | <a href="https://repository.umy.ac.id">repository.umy.ac.id</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 24 | <a href="https://worldwidescience.org">worldwidescience.org</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 25 | Submitted to Universitas Sebelas Maret<br>Student Paper   | <1 % |
| 26 | <a href="https://repository.unair.ac.id">repository.unair.ac.id</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 27 | <a href="http://www.tcsae.org">www.tcsae.org</a><br>Internet Source   | <1 % |
| 28 | Submitted to Sriwijaya University<br>Student Paper  | <1 % |
| 29 | Submitted to Universitas Muhammadiyah Purwokerto<br>Student Paper   | <1 % |
| 30 | <a href="https://pt.scribd.com">pt.scribd.com</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 31 | Gusri Akhyar Ibrahim. "The ANALISIS KEKASARAN PERMUKAAN DAN KEBULATAN PADA PEMESINAN DRILL PADUAN MAGNESIUM MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI", Machine : Jurnal Teknik Mesin, 2019<br>Publication | <1 % |
| 32 | <a href="https://adoc.pub">adoc.pub</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 33 | <a href="https://e-theses.iaincurup.ac.id">e-theses.iaincurup.ac.id</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 34 | <a href="https://jurnal.polsri.ac.id">jurnal.polsri.ac.id</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 35 | <a href="https://link.springer.com">link.springer.com</a><br>Internet Source  | <1 % |



|    |   |      |
|----|---|------|
| 36 | <a href="https://briandikayusni.wordpress.com">briandikayusni.wordpress.com</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 37 | <a href="https://id.wikipedia.org">id.wikipedia.org</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 38 | <a href="https://repository.its.ac.id">repository.its.ac.id</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 39 | <a href="https://repository.uin-malang.ac.id">repository.uin-malang.ac.id</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 40 | <a href="https://repository.unej.ac.id">repository.unej.ac.id</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 41 | <a href="https://repository.usahidsolo.ac.id">repository.usahidsolo.ac.id</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 42 | <a href="https://simki.unpkediri.ac.id">simki.unpkediri.ac.id</a><br>Internet Source  | <1 % |
| 43 | <a href="http://www.e-journal.potensi-utama.ac.id">www.e-journal.potensi-utama.ac.id</a><br>Internet Source   | <1 % |
| 44 | Mulyadi Mulyadi, Rachmat Firdaus, Iswanto Iswanto, Mochammad Nur Rizki. "Pengaruh parameter proses friction stir welding dengan material aluminium alloy AA6061-T651 terhadap distorsi dan kekerasan", Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin, 2022<br>Publication | <1 % |
| 45 | Pristanto Ria Irawan, Aliy Rasyid, Dinanti Fepi Ramona. "Pengaruh Ecosystem Orchestration Dan Cross Sector Collaboration Terhadap Peningkatan Kinerja UMKM di Tugu Selatan", Jurnal Minfo Polgan, 2025<br>Publication   | <1 % |