

Contents list available at [Sinta](https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur)**ARMATUR**

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>**Taguchi Optimization of Friction Time and Pressure for Tensile Strength of Rotary Friction-Welded AA6061/AISI 316L Joints****Zuliantoni^{1*}, Nurul Iman Supardi², Hardiansyah³, Lindung Zalbuin Mase⁴, Geovano Rumakiek⁵, Angky Puspawan⁶**^{1,2,5,6} Teknik Mesin, Universitas Bengkulu, Jl. WR. Supratman, Kandang Limun, Bengkulu^{3,4} Teknik Sipil, Universitas Bengkulu, Jl. WR. Supratman, Kandang Limun, Bengkulu**ARTICLE INFO****Keywords:**

Rotary friction welding

Aluminum 6061

Stainless Steel 316L

Taguchi

Tensile Strength

ABSTRACT

An efficient solid-state joining technique for connecting disparate materials like stainless steel 316L and aluminum 6061 is rotary friction welding (RFW). This study uses the Taguchi method to examine how friction duration and pressure affect the tensile strength of joints made of stainless steel 316L and aluminum 6061. While the rotating speed is maintained at 1800 rpm, the forging duration is 30 seconds, the forging pressure is 10 MPa, and the study variables are friction time (60, 90, and 120 seconds) and friction pressure (3, 4, and 5 MPa). Three repetitions of the Taguchi L9 orthogonal matrix were employed in the experimental design for every combination of parameters. The findings demonstrated that tensile strength rose as friction time and friction pressure increased. At a friction time of 120 seconds and a friction pressure of 5 MPa, the maximum tensile strength value of 133.05 MPa was attained. Friction duration was the most significant element influencing tensile strength, contributing 79.6%, while friction pressure contributed 18.7%, according to the Signal-to-Noise Ratio (S/N Ratio) analysis of the Larger-The-Better category. At a friction time of 120 seconds and a friction pressure of 5 MPa, the ideal set of parameters was found.

Pendahuluan

Industri manufaktur modern semakin berkembang, sehingga membutuhkan bahan yang tidak hanya kuat

secara mekanik, tetapi juga ringan, tahan terhadap karat, dan murah. Kebutuhan itu semakin besar di berbagai sektor seperti transportasi, otomotif, perkapalan, energi,

*Corresponding author: zuliantoni@unib.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i2.12228>

Received 25 June 2026; Received in revised form 7 July 2026; Accepted 16 July 2026

Available online September 2026

dan konstruksi yang terus berusaha mengurangi berat komponen tanpa mengurangi kemampuan struktur secara langsung [1]. Salah satu cara yang sering digunakan untuk memenuhi persyaratan tersebut adalah dengan menggabungkan bahan-bahan yang berbeda dalam satu bagian, sehingga kelebihan dari masing-masing bahan tersebut dapat digunakan sebaik-baiknya. Dalam konteks ini, kombinasi material aluminium dan baja tahan karat sangat potensial karena bisa membuat struktur yang memiliki kekuatan tinggi dibandingkan beratnya dan tahan terhadap karat [2].

Aluminium 6061 (AA6061) memiliki berat yang relatif ringan, mudah dibentuk, tahan terhadap karat, serta bisa diukir atau dikerjakan secara mesin dengan baik. Selain itu, AA6061 juga memiliki daya tahan mekanik yang baik setelah menjalani proses pemanasan, sehingga sering digunakan pada komponen struktur yang ringan [3]. Di sisi lain, Stainless Steel 316L (SS316L) adalah jenis baja tahan karat austenitik yang sangat tahan terhadap korosi, terutama di lingkungan yang mengandung klorida, serta mempunyai kekuatan dan ketangguhan yang sangat baik [4]. Gabungan bahan AA6061 dan SS316L bisa membuat komponen hybrid yang ringan namun kuat dan tahan karat, sehingga sangat cocok untuk digunakan di berbagai bidang industri [5].

Meski begitu, menghubungkan logam aluminium dengan stainless steel tetap menjadi masalah besar dalam industri manufaktur. Perbedaan dalam sifat fisik, mekanik, dan metalurgi antara kedua bahan membuat metode pengelasan konvensional yang menggunakan prinsip peleburan sering kali menghasilkan kualitas pengelasan yang tidak cukup baik. Masalah utama yang terjadi adalah munculnya lapisan senyawa Fe-Al yang keras dan mudah pecah di area permukaan sambungan. Senyawa intermetalik tersebut bisa membuat kekuatan mekanik sambungan berkurang banyak karena mudah menjadi titik awal retak ketika

terjadi beban. Selain itu, perbedaan pada titik leleh, kapasitas menghantarkan panas, dan tingkat pemuaian termal antara aluminium dan stainless steel bisa menyebabkan timbulnya tegangan sisa yang membuat kualitas pengelasan menjadi lebih buruk [6].

Untuk mengatasi berbagai masalah tersebut, proses pengelasan dalam keadaan padat menjadi solusi alternatif yang semakin banyak dikembangkan. Salah satu cara yang menunjukkan hasil yang sangat menjanjikan adalah teknik *Rotary friction welding*. Metode ini menggunakan panas yang dihasilkan dari gesekan dua permukaan bahan yang ditekan dan diputar satu sama lain hingga bahan mencapai kondisi lembek, lalu dilanjutkan dengan proses penekanan untuk membentuk ikatan logam yang kuat. Karena tidak menggunakan proses penggabungan bahan dasar, RFW bisa mengurangi pembentukan senyawa intermetalik secara berlebihan, mengurangi cacat pada hasil las, serta memberikan kualitas mekanik pengelasan yang lebih baik dibandingkan metode las biasa [7].

Kemampuan proses *Rotary friction welding* sangat bergantung pada parameter-parameter yang digunakan dalam proses tersebut. Beberapa faktor penting yang memengaruhi kualitas sambungan mencakup kecepatan putar, lama waktu gesek, besar tekanan gesek, durasi waktu tempa, dan tingkat tekanan tempa. Parameter-parameter tersebut langsung memengaruhi jumlah panas yang dihasilkan saat proses pengelasan, tingkat peregangan plastis bahan, cara atom berpindah di antara permukaan, serta pembentukan struktur mikro pada sambungan. Di antara berbagai parameter tersebut, waktu gesek dan tekanan gesek merupakan faktor yang sangat penting karena keduanya langsung memengaruhi jumlah panas yang dihasilkan selama proses penyambungan [8].

Waktu gesek yang terlalu pendek bisa membuat panas yang dihasilkan tidak cukup untuk menciptakan deformasi plastis dan ikatan metalurgi yang baik. Justru, jika

waktu gesek terlalu lama, suhu permukaan akan naik terlalu tinggi, sehingga mempercepat pembentukan lapisan intermetalik yang bisa mengurangi daya tahan sambungan. Demikian pula, tekanan gesek yang terlalu kecil bisa membuat kontak antar permukaan tidak cukup baik, sehingga kualitas ikatan menjadi buruk, sedangkan tekanan gesek yang terlalu besar bisa menyebabkan bentuk sambungan berubah dan terjadi pemotongan berlebihan. Sebab itu, diperlukan waktu gesek dan tekanan gesek yang sesuai agar diperoleh kekuatan tarik pada sambungan yang maksimal [9].

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa parameter dalam proses pengelasan gesek rotary berpengaruh besar terhadap sifat pengelasan bahan yang berbeda. Namun, sebagian besar penelitian lebih banyak menyoroti dampak kecepatan putaran, karakterisasi struktur mikro, atau penilaian sifat mekanik secara umum. Penelitian khusus tentang hubungan antara waktu gesek dan tekanan gesek dalam pengelasan sambungan dissimilar AA6061–SS316L masih belum terlalu banyak. Selain itu, kebanyakan penelitian menggunakan metode eksperimen yang biasa, yang butuh banyak percobaan sehingga kurang efektif dalam hal waktu dan biaya [10].

Metode Taguchi adalah salah satu cara melakukan eksperimen desain yang efektif untuk mengatasi masalah tersebut. Metode ini memudahkan dalam mengetahui parameter mana yang paling penting dan menentukan kombinasi parameter terbaik dengan menggunakan orthogonal array, sehingga jumlah percobaan bisa ditekan tanpa mengurangi mutu hasil analisisnya. Selain itu, analisis rasio sinyal terhadap noise (S/N) yang digunakan dalam metode Taguchi mampu menilai seberapa stabil respons proses terhadap perubahan faktor-faktor dalam eksperimen. Karena itu, metode Taguchi merupakan pendekatan yang tepat untuk mengoptimalkan parameter proses pengelasan gesek rotasi

pada sambungan material yang berbeda [11].

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, masih ada celah dalam penelitian (*research gap*) mengenai pengoptimalan parameter waktu gesek dan tekanan gesek pada proses penyambungan dengan metode Rotary Friction Welding untuk bahan Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L. Beberapa penelitian sebelumnya hanya melihat pengaruh satu faktor secara sendirian, sedangkan penelitian yang membahas kontribusi masing-masing faktor serta kombinasi terbaik dari faktor-faktor tersebut terhadap daya ikat sambungan masih sedikit. Selain itu, informasi mengenai parameter utama yang berpengaruh terhadap kekuatan tarik pengelasan antara bahan AA6061 dan SS316L berdasarkan analisis Taguchi belum banyak tersedia dalam laporan sebelumnya [12].

Dengan demikian, penelitian ini memiliki keunikan berupa penggunaan metode Taguchi untuk menganalisis serta mengoptimalkan pengaruh dua parameter penting, yaitu waktu gesek dan tekanan gesek, terhadap kekuatan tarik sambungan yang berbeda jenis bahan, yaitu Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L, yang diperoleh melalui proses Rotary Friction Welding. Penelitian ini tidak hanya ingin mencari kombinasi parameter terbaik yang menghasilkan kekuatan tarik maksimal, tetapi juga ingin mengetahui parameter mana yang paling berpengaruh terhadap kualitas sambungan dengan menganalisis Signal-to-Noise Ratio dan Analysis of Variance (ANOVA). Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu dalam kemajuan ilmu pengetahuan terkait pengembangan teknologi pengelasan material yang berbeda serta menjadi pedoman bagi industri dalam menentukan parameter proses Rotary Friction Welding yang lebih baik, lebih hemat, dan mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas yang tinggi.

Metode Penelitian

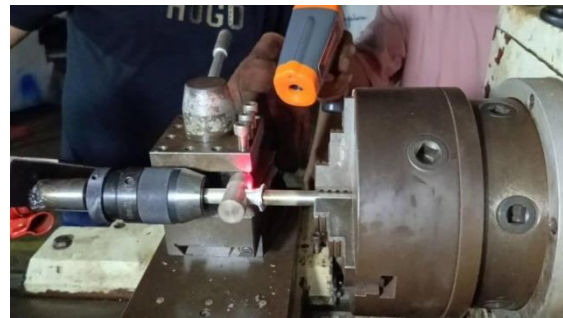
Penelitian ini menggunakan bahan Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L yang disambungkan dengan metode Rotary Friction Welding (RFW). Kedua bahan tersebut dibentuk menjadi silinder dengan ukuran yang disesuaikan dengan kemampuan mesin RFW. Sebelum dilakukan pengelasan, ujung spesimen dibersihkan untuk menghilangkan minyak, kotoran, dan lapisan oksida agar sambungan yang dihasilkan memiliki kualitas yang terbaik.

Proses pengelasan dilaksanakan dengan mesin bubut yang telah diubah suai menjadi mesin RFW (Gambar 1). Beberapa parameter yang tetap dijaga adalah kecepatan rotasi 1800 rpm, durasi tempa 30 detik, dan tekanan tempa 10 MPa. Di sisi lain, parameter yang bervariasi meliputi durasi gesek (60, 90, dan 120 detik) serta tekanan gesek (3, 4, dan 5 MPa). Tekanan gesek diatur menggunakan sistem hidrolik atau pneumatik yang memberikan tekanan aksial pada komponen yang berputar. Tekanan menghasilkan panas sehingga terbentuk sambungan las yang kokoh.

Rancangan penelitian dibuat dengan menerapkan metode Design of Experiments (DOE) melalui pendekatan Taguchi. Dua variabel yang diteliti, yaitu durasi gesekan (A) dan tekanan gesekan (B), masing-masing memiliki tiga tingkat, sehingga digunakan Orthogonal Array L9 (3^2) yang menghasilkan sembilan kombinasi percobaan. Setiap kombinasi parameter digunakan dalam proses pengelasan, kemudian spesimen diuji dengan metode tarik untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik sambungan.

Data yang diperoleh dari pengujian dievaluasi dengan menggunakan Rasio Signal-to-Noise (S/N) dengan kriteria lebih besar lebih baik untuk menemukan kombinasi parameter yang memberikan kekuatan tarik tertinggi. Kemudian, Analisis Varians (ANOVA) menggunakan software Minitab diterapkan untuk menilai seberapa signifikan dan kontribusi setiap parameter terhadap kekuatan tarik dari

sambungan yang dihasilkan dari proses pengelasan.



Gambar 1. Proses Penyambungan spesimen

Hasil dan Pembahasan

Gambar 2 memperlihatkan hasil proses pengelasan gesek (friction welding) yang telah dilakukan penyambungan. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa waktu gesek dan tekanan gesek memiliki dampak besar terhadap peningkatan kekuatan tarik pada sambungan yang tidak serupa antara Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L. Data kekuatan tarik rata-rata yang didapat berada antara 71,26 MPa sampai 133,05 Mpa, tergantung pada kombinasi parameter pengelasan yang digunakan.



Gambar 2. Spesimen hasil pengelasan gesek putar (Rotary Friction Welding). (a) Spesimen 1, (b) Spesimen 2, (c) Spesimen 3.

Pada tekanan gesek 3 MPa, peningkatan waktu gesek dari 60 detik ke 90 detik menyebabkan kekuatan tarik meningkat dari 71,26 MPa menjadi 100,03 MPa, atau naik sekitar 40,37%. Ketika durasi gesek ditingkatkan lagi menjadi 120 detik, gaya tarik mencapai 123,05 MPa, yang menunjukkan bahwa semakin lama kontak gesek menghasilkan ikatan sambungan yang semakin kuat.

Tren yang sama juga terjadi pada tekanan gesek 4 MPa. Kekuatan tarik naik dari 88,63 MPa pada saat gesek 60 detik menjadi 108,16 MPa pada 90 detik, lalu mencapai 126,58 MPa pada 120 detik. Peningkatan ini menunjukkan bahwa dengan waktu gesek yang lebih lama, panas yang dihasilkan cukup untuk memperbaiki proses pembentukan plastis serta pembentukan ikatan logam pada area sambungan.

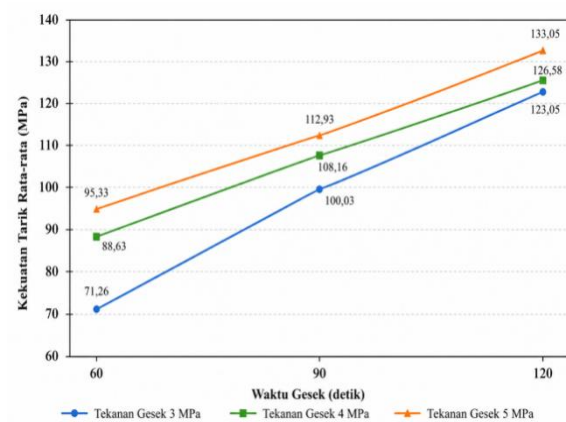
Dengan tekanan gesek sebesar 5 MPa, hasil kekuatan tarik yang didapat adalah yang paling baik dibandingkan dengan kombinasi parameter lainnya. Kekuatan tarik naik dari 95,33 MPa pada gesekan 60 detik, menjadi 112,93 MPa pada 90 detik, dan mencapai nilai tertinggi 133,05 MPa pada gesekan 120 detik seperti pada tabel 1 dan gambar 3. Hasil ini menunjukkan bahwa dengan tekanan gesek yang tinggi dan durasi gesek yang cukup lama, dapat dihasilkan kondisi pengelasan yang terbaik.

Tabel 1. Nilai Rata-rata Kekuatan Tarik

Waktu Gesek (det)	Tekanan Gesek (MPa)	Kekuatan Tarik Rata-rata (MPa)
60	3	71,26
90	3	100,03
120	3	123,05
60	4	88,63
90	4	108,16
120	4	126,58
60	5	95,33
90	5	112,93
120	5	133,05

Jika dilihat berdasarkan dampak dari tekanan gesek pada waktu yang sama, tampak bahwa kenaikan tekanan dari 3 MPa menjadi 5 MPa selalu diiringi dengan

peningkatan kekuatan tarik. Pada waktu gesek selama 60 detik, kekuatan tarik bertambah dari 71,26 MPa menjadi 95,33 MPa. Selama 90 detik waktu gesek, kekuatan tarik berkembang dari 100,03 MPa menjadi 112,93 MPa, sementara pada waktu 120 detik mengalami peningkatan dari 123,05 MPa menjadi 133,05 MPa. Ini menunjukkan bahwa tekanan gesek yang lebih tinggi dapat meningkatkan laju penghasilan panas akibat gesekan serta meningkatkan deformasi plastis di permukaan yang bersentuhan, sehingga menciptakan ikatan yang lebih kuat.



Gambar 3. Interaksi Waktu Gesek dan Tekanan Gesek terhadap Kekuatan Tarik

Secara umum, temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa baik peningkatan durasi gesekan maupun tekanan gesekan berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik sambungan. Kombinasi optimal diperoleh pada durasi gesekan 120 detik dan tekanan gesekan 5 MPa, dengan kekuatan tarik rata-rata mencapai 133,05 MPa. Sementara itu, kondisi terendah ditemukan pada durasi gesekan 60 detik dan tekanan gesekan 3 MPa, dengan kekuatan tarik sebesar 71,26 MPa. Fenomena ini menunjukkan bahwa lonjakan energi panas dan perubahan plastis selama proses pengelasan dengan gesekan putar memiliki peranan penting dalam meningkatkan mutu sambungan dan kekuatan mekanik dari hasil pengelasan [13].

Analisis Rasio Signal-to-Noise (S/N Ratio) dilaksanakan dengan menggunakan

karakteristik Larger-The-Better, sebab tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai maksimal dari kekuatan tarik sambungan. Pendekatan ini diterapkan untuk mengidentifikasi gabungan parameter proses yang dapat memberikan hasil terbaik sekaligus mereduksi dampak dari faktor-faktor gangguan (noise) selama proses pengelasan gesek putar (Rotary Friction Welding).

Tabel 2. Hasil rata-rata S/N Ratio Faktor A (Waktu Gesek) dan Faktor B (Tekanan Gesek)

Level A (detik)	Nilai S/N (dB)	Level B (MPa)	Nilai S/N (dB)
60	38,54	3	39,34
90	40,69	4	40,34
120	42,11	5	40,84

Berdasarkan analisis rata-rata S/N Ratio pada Faktor A (Waktu Gesek), diperoleh nilai S/N mencapai 38,54 dB pada durasi gesek 60 detik, 40,69 dB pada durasi gesek 90 detik, dan 42,11 dB pada durasi gesek 120 detik seperti tercantum pada tabel 2. Temuan ini menunjukkan bahwa nilai S/N Ratio meningkat seiring dengan bertambahnya waktu gesek. Peningkatan nilai S/N Ratio menunjukkan bahwa durasi gesek yang lebih panjang dapat menciptakan kualitas sambungan yang lebih baik dan lebih stabil. Hal ini terjadi karena semakin lama gesekan berlangsung, semakin banyak energi panas yang dihasilkan, sehingga proses pelunakan material pada permukaan sambungan menjadi lebih optimal. Akibatnya, ikatan metalurgi yang terbentuk menjadi lebih kuat dan meningkatkan kekuatan tarik [14].

Pada Faktor B (Tekanan Gesek), rata-rata nilai S/N Ratio yang diperoleh adalah 39,34 dB pada tekanan gesek 3 MPa, 40,34 dB pada tekanan gesek 4 MPa, dan 40,84 dB pada tekanan gesek 5 MPa. Pola peningkatan nilai S/N Ratio menunjukkan bahwa peningkatan tekanan gesek berdampak positif terhadap kualitas

sambungan. Tekanan gesek yang lebih tinggi meningkatkan deformasi plastik di area kontak dan mempercepat penghilangan lapisan oksida serta kontaminan dari permukaan material. Oleh karena itu, interaksi antar bahan menjadi lebih baik, yang menghasilkan sambungan yang lebih seragam dan memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi [15].

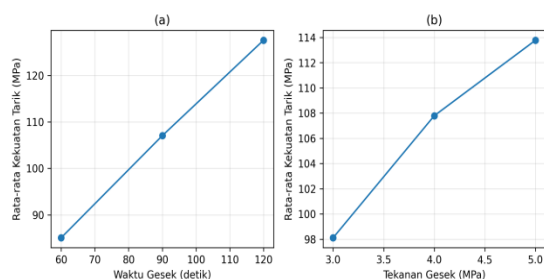
Perbandingan rasio S/N antara kedua faktor menunjukkan bahwa waktu gesek memiliki dampak yang lebih kuat dibandingkan tekanan gesek, terlihat dari rentang perubahan nilai S/N Ratio yang lebih luas. Pada faktor waktu gesek, selisih antara nilai maksimum dan minimum mencapai 3,57 dB, sementara untuk faktor tekanan gesek hanya 1,50 dB. Ini menunjukkan bahwa variasi waktu gesek memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap peningkatan kekuatan tarik sambungan jika dibandingkan dengan variasi tekanan gesek.

Berdasarkan hasil analisis S/N Ratio, kombinasi dengan hasil tertinggi ditemukan pada waktu gesek 120 detik (A3) serta tekanan gesek 5 MPa (B3). Dengan demikian, kombinasi parameter ideal yang disarankan untuk mencapai kekuatan tarik maksimum pada sambungan dissimilar antara Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L menggunakan metode Rotary Friction Welding adalah A3B3 (120 detik dan 5 MPa). Hasil ini konsisten dengan studi sebelumnya mengenai Pengelasan Gesekan Rotary (RFW), yang mengungkapkan bahwa durasi gesekan dan tekanan ideal menghasilkan ikatan metalurgi yang lebih kuat, meningkatkan kekuatan tarik, serta menciptakan lapisan intermetalik (IMC) yang lebih tipis dan merata, sehingga karakteristik mekanik sambungan menjadi lebih baik [16]. Hasil penelitian ini juga didukung oleh studi mengenai berbagai sambungan logam yang berbeda dengan menggunakan Rotary Friction Welding. Studi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi tekanan gesekan dan tekanan tempa yang sesuai dapat memperbaiki struktur mikro di area

sambungan, yang akan meningkatkan kekerasan lokal dan memberikan kekuatan tarik yang lebih baik dibandingkan dengan pengaturan yang tidak optimal [17].

Hasil kajian menunjukkan bahwa waktu gesekan memiliki dampak yang signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan dissimilar Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L yang diperoleh melalui proses Rotary Friction Welding (RFW). Berdasarkan nilai rata-rata kekuatan tarik yang didapat, peningkatan waktu gesekan dari 60 detik ke 120 detik menghasilkan peningkatan kekuatan tarik yang sangat signifikan. Pada waktu gesekan 60 detik, rata-rata kekuatan tarik yang diperoleh adalah 85,07 MPa. Angka ini meningkat menjadi 107,04 MPa pada waktu gesekan 90 detik dan mencapai 127,56 MPa pada waktu gesekan 120 detik.

Peningkatan kekuatan tarik dari durasi 60 detik ke 90 detik sebesar 25,83%, sementara dari 90 detik ke 120 detik meningkat sebesar 19,17%. Secara keseluruhan, terdapat peningkatan kekuatan tarik sebesar 49,96% pada saat waktu gesek ditingkatkan dari 60 detik menjadi 120 detik. Temuan ini mengindikasikan bahwa semakin lama waktu gesek yang diterapkan selama proses pengelasan, maka semakin besar kekuatan tarik sambungan yang dihasilkan.



Gambar 4. Efek utama (a) waktu gesek dan (b) tekanan gesek terhadap kekuatan tarik

Fenomena ini terjadi karena durasi gesekan yang lebih panjang memungkinkan pembentukan energi panas yang lebih banyak sebagai akibat dari gesekan antara kedua material. Kenaikan suhu di area sambungan mendorong terjadinya deformasi plastis yang lebih signifikan dan mempercepat proses difusi atom di antara

material yang disatukan. Selain itu, lapisan oksida dan kotoran pada permukaan sambungan dapat dihilangkan dengan lebih efektif sehingga menghasilkan ikatan metalurgi yang lebih kokoh. Dengan cara ini, kualitas sambungan meningkat yang terlihat dari peningkatan nilai kekuatan tarik pada durasi gesekan yang lebih lama [18].

Uji yang dilakukan juga menunjukkan bahwa tekanan gesek memiliki dampak baik terhadap kekuatan tarik sambungan yang dihasilkan oleh Rotary Friction Welding. Rata-rata kekuatan tarik saat tekanan gesek 3 MPa adalah 98,11 MPa, lalu meningkat menjadi 107,79 MPa pada tekanan 4 MPa, dan mencapai 113,77 MPa pada tekanan 5 MPa.

Peningkatan kekuatan tarik dari tekanan gesek 3 MPa menjadi 4 MPa adalah sebesar 9,87%, sedangkan dari 4 MPa ke 5 MPa mengalami peningkatan sebesar 5,55%. Secara total, peningkatan tekanan gesek dari 3 MPa hingga 5 MPa menghasilkan pertambahan kekuatan tarik sebesar 15,96%. Temuan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan gesek yang diberikan, semakin baik kualitas sambungan yang dihasilkan.

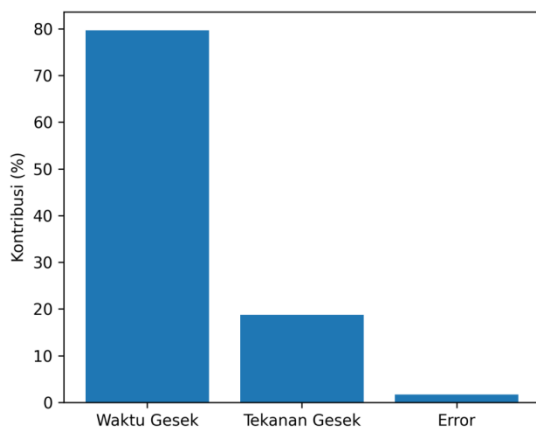
Tabel 3. Perhitungan Sum of Squares, kontribusi, dan level optimum

Faktor	SS	Kontribusi (%)	Level Optimum
Waktu Gesek	2716,14	79,62	120 detik
Tekanan Gesek	639,12	18,73	5 MPa
Error	56,04	1,64	
Total	3411,30		

Peningkatan daya tarik pada tekanan gesek yang lebih tinggi terjadi karena adanya peningkatan area kontak efektif antara dua bahan selama proses pengelasan.

Tekanan yang lebih tinggi juga mempercepat laju deformasi plastis di area antarmuka, sehingga bahan dapat terikat dengan lebih baik. Di samping itu, tekanan gesek yang tinggi berperan dalam mengeluarkan lapisan oksida, kotoran, dan bahan yang terdeformasi dari zona penghubung, sehingga menghasilkan antarmuka yang lebih seragam. Kondisi ini mendukung terbentuknya ikatan metalurgi yang lebih kokoh dan mengurangi kemungkinan munculnya cacat pada area las, sehingga daya tarik [19].

Analisis variansi (ANOVA) dilaksanakan untuk mengevaluasi seberapa besar pengaruh setiap parameter proses terhadap daya tarik sambungan yang berbeda antara Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L yang diperoleh melalui teknik Rotary Friction Welding (RFW). Perhitungan menunjukkan bahwa nilai Jumlah Kuadrat (SS) total mencapai 3411,30, yang mencakup kontribusi dari waktu gesekan, tekanan gesekan, dan kesalahan.



Gambar 5. kontribusi Waktu Gesek, Tekanan Gesek, dan Error

Berdasarkan temuan ANOVA, faktor waktu gesek menunjukkan nilai SS sebesar 2716,14 dengan kontribusi persentase sebesar 79,62%, menjadikannya sebagai faktor yang paling berpengaruh terhadap kekuatan tarik sambungan. Faktor tekanan gesek mempunyai nilai SS sebesar 639,12 dengan kontribusi sebesar 18,73%, sementara error hanya mencatat nilai 56,04

atau 1,64% seperti yang tercantum pada tabel 3 dan gambar 5. Nilai error yang rendah mengindikasikan bahwa data pengujian memiliki tingkat konsistensi yang tinggi dan sebagian besar variasi dalam kekuatan tarik dapat dijelaskan oleh parameter yang sedang diteliti.

Hasil tabel ANOVA menunjukkan bahwa tingkat terbaik untuk waktu gesekan ada di level 3 (120 detik), sedangkan tingkat terbaik untuk tekanan gesekan juga ada di level 3 (5 MPa). Ini menunjukkan bahwa bertambahnya waktu gesekan dan tekanan gesekan dalam rentang penelitian berpengaruh positif pada peningkatan kekuatan tarik sambungan.

Kekuatan pengaruh waktu gesek yang mencapai 79,62% menunjukkan bahwa lama gesekan adalah elemen kunci yang mempengaruhi mutu ikatan metalurgi saat proses Pengelasan Friksi Rotary dilakukan. Ketika proses gesekan terjadi, energi mekanis yang dihasilkan dari pertemuan antarpermukaan diubah menjadi panas. Dengan bertambahnya lama waktu gesek, semakin besar jumlah panas yang terbentuk di zona sambungan. Peningkatan suhu ini membuat bahan di area kontak mengalami deformasi plastis, sehingga memperluas zona kontak yang efektif antara bahan.

Selain itu, durasi gesekan yang lebih panjang memungkinkan terjadinya difusi atom yang lebih mendalam di permukaan Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L. Proses difusi ini memperkuat pembentukan ikatan metalurgi yang lebih baik, sehingga kemampuan sambungan untuk menahan beban tarik meningkat. Hal ini sejalan dengan temuan dari pengujian yang menunjukkan bahwa kekuatan tarik meningkat seiring bertambahnya waktu gesekan hingga mencapai nilai paling tinggi pada waktu gesekan 120 detik.

Di sisi lain, gaya gesek memberikan sumbangan sebesar 18,73%. Walaupun pengaruhnya tidak sebesar waktu gesek, gaya gesek tetap memainkan peran penting dalam meningkatkan kualitas sambungan. Gaya yang lebih tinggi menghasilkan

deformasi plastis yang lebih signifikan pada area antarmuka sehingga lapisan oksida dan kotoran permukaan bisa terlepas dengan efektif. Hal ini mengakibatkan kontak antara logam menjadi lebih baik dan proses difusi antar bahan berlangsung lebih optimal.

Namun, dampak dari tekanan gesek tidak sekuat waktu gesek, karena tekanan hanya berperan dalam memperbesar area kontak dan perubahan bentuk material, sementara peningkatan panas yang terus menerus lebih banyak dipengaruhi oleh durasi proses gesekan. Oleh sebab itu, dalam kajian ini, waktu gesek menjadi faktor paling penting dalam peningkatan kekuatan tarik sambungan.

Nilai kesalahan yang hanya mencapai 1,64% menunjukkan bahwa ada faktor-faktor lain di luar parameter penelitian yang berdampak sangat kecil terhadap variasi data. Oleh karena itu, model eksperimen yang digunakan bisa dianggap mampu menggambarkan hubungan antara parameter proses dan respons kekuatan tarik dengan tingkat keandalan yang tinggi.

Analisis dengan metode Taguchi menghasilkan perpaduan parameter terbaik yang dapat memberikan kekuatan tarik paling tinggi pada sambungan hasil dari Rotary Friction Welding. Perpaduan parameter terbaik ini terdiri dari waktu gesek selama 120 detik dan tekanan gesek sebanyak 5 MPa.

Tabel 3. Kombinasi parameter optimum

Faktor	Level Optimum
Waktu Gesek	120 detik
Tekanan Gesek	5 MPa

Berdasarkan kalkulasi Taguchi, estimasi nilai kekuatan tarik terbaik yang mungkin dicapai adalah:

$$\mu_{\text{opt}} = 133,05 \text{ Mpa}$$

Angka tersebut adalah hasil dari kekuatan tarik maksimum yang didapatkan sepanjang penelitian.

Gabungan waktu gesek 120 detik dan tekanan gesek 5 MPa menciptakan kondisi pengelasan yang paling optimal untuk menyatukan Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L seperti pada tabel 3. Durasi gesek yang lebih lama memungkinkan terciptanya panas dari gesekan yang memadai untuk meningkatkan deformasi plastis serta memperbaiki proses difusi antara bahan-bahan di area sambungan. Sementara itu, tekanan gesek 5 MPa memberi gaya tekan yang cukup untuk memperluas wilayah kontak yang efektif dan membersihkan lapisan oksida dari permukaan material.

Sinergi antara kedua faktor tersebut menciptakan area sambungan yang lebih seragam dan memiliki kualitas ikatan logam yang lebih baik dibandingkan dengan kombinasi faktor lainnya. Peningkatan kualitas ikatan ini terlihat dari nilai kekuatan tarik terbaik yang mencapai 133,05 MPa, yang menunjukkan seberapa baik sambungan itu bisa menahan beban tarik secara maksimal.

Hasil dari penelitian ini juga menunjukkan bahwa pengaturan parameter proses dengan metode Taguchi adalah cara yang efektif untuk menemukan kondisi pengelasan yang paling baik pada sambungan Aluminium 6061 dan Stainless Steel 316L yang berbeda. Dengan memahami faktor utama dan kombinasi parameter terbaik, proses Pengelasan Gesekan Rotary bisa dikelola dengan lebih baik untuk menghasilkan sambungan yang memiliki kekuatan mekanik yang lebih tinggi.

Kesimpulan

Penelitian ini mengungkapkan bahwa durasi gesek dan tekanan gesek memberikan dampak yang signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan Aluminium 6061–Stainless Steel 316L yang dihasilkan melalui Rotary Friction Welding (RFW). Analisis menggunakan

metode Taguchi menunjukkan bahwa pengaturan parameter yang ideal terdapat pada durasi gesek selama 120 detik dan tekanan gesek 5 MPa, di mana dapat mencapai kekuatan tarik maksimum sebesar 133,05 MPa. Hasil analisis ANOVA menjelaskan bahwa durasi gesek merupakan faktor yang paling berpengaruh dengan kontribusi sebesar 79,62%, sedangkan tekanan gesek berkontribusi 18,73%. Temuan ini menunjukkan bahwa pengoptimalan parameter RFW terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas sambungan berbeda material dan dapat dijadikan acuan untuk penggunaan di industri. Penelitian yang akan datang disarankan untuk menyelidiki struktur mikro serta pembentukan senyawa di area antarmuka untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam tentang mekanisme penguatan sambungan.

Ucapan terimakasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Mesin yang telah memberikan tempat untuk penelitian dan kepada semua orang yang telah membantu dalam proses penelitian ini. Penelitian ini dilakukan sendiri dan semua biayanya ditanggung oleh penulis.

Referensi (Minimal 15 Referensi)

- [1] A. Hai *et al.*, “Additive manufacturing in the aerospace and automotive industries : Recent trends and role in achieving sustainable development goals,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 14, no. 11, p. 102516, 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102516.
- [2] A. S. Khan, M. Umar, F. Khan, K. Sun, and P. Dong, “Multi-material additive manufacturing of aluminum 6061-T6 alloy with stainless steel 304 : Suppression of intermetallic compounds and interface growth mechanism ☆,” *J. Manuf. Process.*, vol. 166, no. November 2025, pp. 303–318, 2026, doi: 10.1016/j.jmapro.2026.03.048.
- [3] A. Tranggono *et al.*, “Analisis Sifat Mekanik Aluminium 6061 dengan Variasi Temperatur Reforming pada Sidewall Kereta,” *J. Perkeretaapi. Indones. (Indonesian Railw. Journal)*, vol. 10, no. 1, 2026.
- [4] M. A. P. Wibisono and A. H. A. Rasyid, “ANALISIS PENGARUH BAHAN COATING PADA MATERIAL STAINLESS STEEL 316L DALAM LARUTAN H₂SO₄ TERHADAP LAJU KOROSI,” *J. Tek. Mesin Unesa*, vol. 14, no. 04, pp. 199–205, 2021.
- [5] M. Agarwal, J. Shukla, A. Kumar, N. Shukla, and R. Srivastava, “Materials Today : Proceedings Microstructural evaluation of Al6061-SS316L cast composite reinforced by Ball-milled Al / Powder-SS316L / chip,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.12.148.
- [6] M. Dada and P. Popoola, *Recent advances in joining technologies of aluminum alloys : a review*, no. September. Springer International Publishing, 2024. doi: 10.1007/s43939-024-00155-w.
- [7] V. Y. Risonarta, M. Alfath, Z. Haq, T. Mesin, F. Teknik, and U. Brawijaya, “Pengaruh Parameter Friction Welding untuk Aluminium dan Tembaga : Tinjauan Literatur,” *J. Tek. Mesin*, vol. 21, no. 2, pp. 83–94, 2024.
- [8] M. I. Maulana, A. Hafizh, and A. Rasyid, “SIMULASI PARAMETER PENGELASAN GESEK ROTARI PADA AL ALLOY 6061 T-6 DAN AISI 1018 DENGAN FINITE ELEMENT METHOD (FEM),” *Otopro*, vol. 17, no. 2, pp. 38–47, 2022, doi: 10.26740/otopro.v17n2.p38-47.
- [9] I. Sofwan, Sugiyanto, and Erwanto, “Fenomena Las Gesek (Friction Welding) Dengan Variasi Waktu Gesek Pada Material AISI 1040 Dengan Kuningan,” *J. Inov. Teknol.*

- Terap.*, vol. 01, no. 2, 2023.
- [10] Y. Purwaningrum, R. Putra, and E. R. Fachreza, "Optimasi Sifat Mekanik Sambungan Las Rotary Friction Welding (RFW) pada Baja AISI 1008 dengan Variasi Waktu Pengelasan Optimization of Mechanical Properties of Rotary Friction Welding (RFW) Joints in AISI 1008 Steel with Friction Time Variation," *J. Ris. Sains dan Teknol.*, vol. 9, no. 2, pp. 249–254, 2025, doi: 10.30595/jrst.v9i2.24402.
- [11] P. Halimah and Y. Ekawati, "Penerapan Metode Taguchi untuk Meningkatkan Kualitas Bata Ringan pada UD . XY Malang," *J. Ind. Eng. Manag. Syst.*, pp. 13–26, 2020, doi: 10.30813/jiems.v13i1.1694.
- [12] W. W. Basuki, E. D. Ginting, H. Bram, N. Hudaya, and H. Sutanto, "Friction Stir Welding pada Paduan Aluminium 6061 dan HDPE menggunakan Mesin Frais," *Cyland. J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 10, no. April, 2024.
- [13] R. A. Saputra, Afdal, and Mukhnizar, "ANALISIS KEKUATAN TARIK HASIL SAMBUNGAN PENGELASAN GESEK PADA BAJA ST42," *Ekasakti Eng. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 98–110, 2024.
- [14] I. Feddal, M. Chairi, and G. Di Bella, "Analysis of Friction Stir Welding of Aluminum Alloys," *Metals (Basel)*, vol. 15, no. 532, pp. 1–37, 2025.
- [15] E. Yasa, O. Poyraz, A. Molyneux, A. Sharman, G. M. Bilgin, and J. Hughes, "Systematic Review on Additive Friction Stir Deposition : Materials , Processes , Monitoring and Modelling," *Inventions*, vol. 9, no. 116, 2024.
- [16] Y. Helal and Z. Boumerzoug, "Dissimilar Friction Stir Welding of AL-6061 to Steel," *AIP Conf. Proc.*, vol. 030008, no. October 2016, 2025, doi: 10.1063/1.4964546.
- [17] J. Singh, A. Handa, and T. Singh, "Materials Today : Proceedings Strength analysis of rotary friction welded joints of dissimilar steel grades," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.07.090.
- [18] F. Dave, M. M. Ali, R. Sherlock, A. Kandasami, and D. Tormey, "Laser Transmission Welding of Semi-Crystalline Polymers and Their Composites : A Critical Review," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 675, pp. 1–51, 2021.
- [19] M. Arif, F. Rahmadiano, T. A. Sutrisno, and K. Malang, "ANALISA PENGARUH VARIASI PERBANDINGAN PULLEY SERTA VARIASI WAKTU PEMANTIK PADA PENGELASAN GESEK (FRICTION WELDING) TERHADAP KEKUATAN UJI TARIK BAJA ST60 DENGAN," *J. MESIN Mater. MANUFAKTUR DAN ENERGI*, vol. 6, no. C, pp. 2–7, 2022.