

[The Effect Of Friction Stir Welding (FSW) Process Parameters On The Tensile Strength Of AA6061-T651 Aluminium Alloy Joint].

[Pengaruh Parameter Proses Friction Stir Welding (FSW) Pada Sambungan Material Aluminium Alloy AA6061-T651 Terhadap Kekuatan Tarik].

Faris Budianto¹, Mulyadi²⁾

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

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

Mulyadi@umsida.ac.id

Abstract. *This research aims to investigate the influence of Friction Stir Welding (FSW) process parameters on the tensile strength of AA6061-T651 aluminum alloy joints, as well as the contribution of each process parameter to the weld quality. AA6061-T651 material was chosen due to its good mechanical properties, lightweight nature, and corrosion resistance, making it suitable for industrial applications such as automotive and aerospace. The FSW method stands out as a superior alternative compared to conventional welding processes because it can produce joints without melting the metal, thereby minimizing welding defects like porosity and cracks. The experimental design in this study employed the Taguchi method with an L16(4⁴) Orthogonal Array. The varied process parameters included Tool Rotation Speed (TRS), Welding Speed (WS), Tool Tilt Angle (TTA), and Concave Shoulder Angle (CSA). Tensile tests were conducted according to ASTM B557M standards using a Universal Testing Machine. The tensile test results were analyzed using the SN ratio approach and Analysis of Variance (ANOVA) to determine the significance of each parameter's influence. The research findings indicate that all parameters, except for Tool Tilt Angle (TTA), significantly affected the tensile strength. The Concave Shoulder Angle (CSA) contributed the most to tensile strength at 52,8%, followed by Welding Speed (WS) at 21,2%, and Tool Rotation Speed (TRS) at 9,2%, while Tool Tilt Angle (TTA) only contributed 8,6%. The optimal parameter combination that yielded maximum tensile strength was TRS at level 4, WS at level 3, TTA at level 3, and CSA at level 1. Therefore, controlling Concave Shoulder Angle (CSA) and Welding Speed (WS) is crucial for optimizing the FSW process to produce high-quality joints in AA6061 material.*

Keyword – Friction Stir Welding, AA6061-T651, Tensile Strength, Process Parameters, ANOVA

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh parameter proses Friction Stir Welding (FSW) terhadap kekuatan tarik sambungan logam aluminium AA6061-T651 serta kontribusi masing-masing parameter proses terhadap hasil lasan. Material AA6061-T651 dipilih karena memiliki sifat mekanik yang baik, ringan, serta tahan korosi, menjadikannya cocok untuk aplikasi industri seperti otomotif dan dirgantara. Metode FSW menjadi alternatif unggulan dibandingkan proses pengelasan konvensional karena mampu menghasilkan sambungan tanpa mencairkan logam, sehingga meminimalkan cacat las seperti porositas dan retak. Desain percobaan dalam penelitian ini menggunakan metode Taguchi dengan *Orthogonal Array* L16(4⁴). Parameter proses yang divariasikan meliputi kecepatan rotasi *tool* (KRT), kecepatan pengelasan (KP), sudut kemiringan *tool* (SKT), dan sudut bahu cekung (SBC). Pengujian tarik dilakukan sesuai standar ASTM B557M menggunakan mesin Universal Testing Machine. Data hasil uji dianalisis menggunakan pendekatan SN ratio dan analisis varians (ANOVA) untuk menentukan signifikansi pengaruh masing-masing parameter. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua parameter, kecuali SKT, berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik. Parameter SBC memberikan kontribusi terbesar terhadap kekuatan tarik sebesar 52,8%, disusul oleh KP (21,2%), dan KRT (9,2%), sementara SKT hanya menyumbang 8,6%. Kombinasi parameter optimum yang menghasilkan kekuatan tarik maksimum adalah KRT level 4, KP level 3, SKT level 3, dan SBC level 1. Dengan

demikian, pengendalian parameter SBC dan KP menjadi kunci dalam optimasi proses FSW untuk menghasilkan sambungan berkualitas tinggi pada material AA6061.

Kata Kunci – *Friction Stir Welding*, AA6061-T651, Kekuatan Tarik, Parameter Proses, ANOVA

I. PENDAHULUAN

Penggunaan bahan alumunium banyak sekali digunakan dalam dunia industri, dikarenakan bahan *alumunium alloy* memiliki banyak keuntungan apabila digunakan dalam dunia industri, terutama alumunium AA6061-T651 [1]. Salah satu keuntungan dalam menggunakan bahan *alumunium alloy* AA6061-T651 adalah bahan yang ringan bila dibandingkan dengan bahan baja dan memiliki ketahanan korosi yang sangat baik. Sehingga cocok digunakan dalam industri manufaktur, misalnya dalam pembuatan kapal, kendaraan seperti mobil, dan pembuatan pesawat terbang [2].

Dalam proses penyambungan alumunium itu sendiri perlu proses pengelasan. Namun proses pengelasan alumunium yang sering digunakan adalah dengan menggunakan proses *fusion welding* seperti Las *Tungsten inertgas* (TIG) maupun Las *Metal inert Gas* (MIG), namun dari kedua metode las tersebut masih bisa terjadi kecacatan dalam proses pengelesan, seperti retak, pororitas, bisa menyebabkan terjadinya deformasi selama proses pendinginan dan proses pembentukan logam gas, dan juga dari kedua metode las tersebut terdapat asap yang sangat berbahaya bagi tubuh apabila terhirup terus menerus [3]. Dengan demikian, untuk mengatasi kekurangan proses TIG dan MIG pada proses pengelasan aluminium, digunakan alternatif lain yaitu penggunaan metode *friction stir welding* (FSW). Pada zaman modern seperti sekarang perkembangan industri manufaktur berkembang dengan pesat terutama pada bidang pengelasan logam. Pengelasan logam tentunya sangat berperan penting dalam industri manufaktur, khususnya pengelasan gesek atau FSW [4].

Prinsip kerja dari FSW adalah dengan gesekan antara dua benda yang terus-menerus sehingga akan menghasilkan panas dan mampu melelehkan material/benda kerja tersebut menjadi tersambung, hal ini menjadi prinsip dasar dari terbentuknya suatu proses pengelasan gesek. Pada proses FSW sendiri terdapat sebuah tool yang berputar dan ditekan pada material yang akan dilakukan pengelasan gesek. Kegunaan dari pengelasan gesek ini adalah sebagai pembuatan bodi pesawat terbang ataupun bodi mobil [5].

Tetapi untuk mendapatkan kualitas dan kekuatan sambungan las yang baik tidak mudah untuk dilakukan. Karena ada beberapa parameter – parameter yang harus diperhatikan pada saat sebelum melakukan pengelasan, beberapa contoh adalah kecepatan putar, waktu gesek, tekanan gesek, material yang akan disambung, desain dan meterial *tool* yang akandigunakan [6].

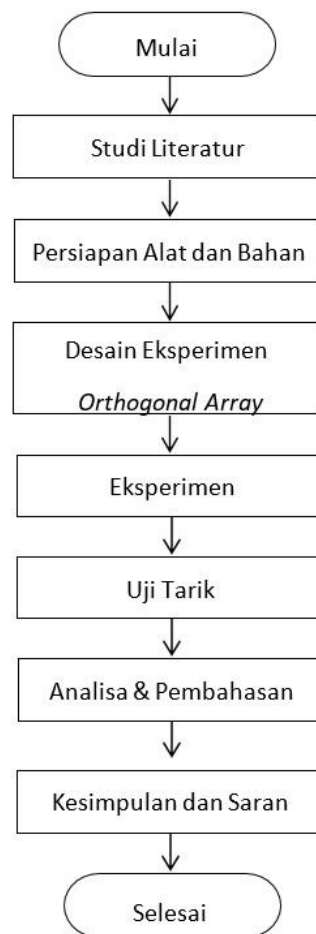
Banyak penelitian tentang parameter yang digunakan dalam pengelasan FSW yang nantinya akan berpengaruh pada saat pengujian lasan, dimana sebelum melakukan pengelasan terlebih dahulu menentukan parameter optimal dari proses FSW dan mengetahui parameter kecepatan putar, kecepatan pengelasan, dan *tool pin* yang nantinya akan berpengaruh pada pengujian tarik dan efisiensi sambungan las [7]. Pada Pengaruh parameter proses, kecepatan rotasi, kecepatan lintasan dan gaya aksial, kondisi pengelasan dioptimalkan untuk memaksimalkan kekuatan tarik dan diperkirakan untuk meningkatkan produktivitas kualitas las [8].

Oleh karena itu, pada penelitian ini menganalisis pengaruh proses FSW (kecepatan pengelasan, kecepatan putaran *tool*, dan juga jenis profil pin terhadap kekuatan tarik. maka terdapat rumusan masalahnya, Bagaimana pengaruh parameter proses dan kontribusi masing – masing FSW terhadap Kekuatan Tarik?.

II. METODE

A. Diagram Alir Penelitian

Pada diagram alir ini dibuat supaya penelitian ini terlaksana sesuai dengan tahapan dan menghindari kerancuan pada saat melakukan penelitian. Oleh karena itu dibuat sebuah diagram alir pada penelitian “Pengaruh Parameter Proses *Friction Stir Welding* (FSW) Pada Sambungan Material *Aluminium Alloy* AA6061-T651 Terhadap Kekuatan Tarik”. Berikut flowchart yang ditunjukkan pada gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Diagram alir

B. Observasi dan Studi Literatur

Serangkaian upaya dalam mengumpulkan informasi atau data melalui sumber informasi yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Serta mengetahui metode apa yang digunakan pada penyelesaian permasalahan yang akan diteliti, serta mendapatkan dasar-dasar referensi yang kuat bagi peneliti dalam menerapkan suatu metode yang digunakan.

C. Persiapan Alat dan Bahan

Sebelum melakukan sebuah eksperimen atau penelitian, terlebih dahulu harus mempersiapkan alat dan bahan yang akan digunakan dalam melakukan penelitian. Alat yang akan digunakan adalah mesin milling, tool pengelasan FSW, benda kerja pengelasan, beserta aksesoris lainnya.

1. Mesin Pembuatan Percobaan Pengelasan

Mesin yang digunakan dalam percobaan atau eksperimen pengelasan FSW adalah Mesin *Frais Universal X6332C Weida*, berikut gambar dari Mesin *Frais Universal X6332C Weida* yang ditunjukkan pada gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Mesin Frais Universal X6332C Weida

Pada eksperimen ini alat yang digunakan untuk mencekam benda kerja adalah menggunakan ragum, dimana ragum yang digunakan adalah ragum meja datar yang berfungsi sebagai pencekam spesimen pada proses pengelasan FSW. Berikut gambar ragum meja datar yang ditunjukkan pada gambar 3 dibawah ini.



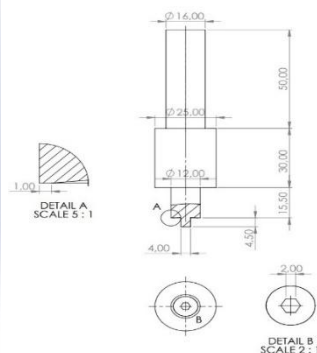
Gambar 3. Ragum Meja Datar

2. Tool Pengelasan FSW

Adapun tool yang digunakan pada proses eksperimen FSW ini adalah *Taper Hexagonal*. Pada *taper hexagonal tool* memiliki bentuk pin yang berbentuk segi enam. Berikut adalah gambar *taper hexagonal tool* yang ditunjukkan pada gambar 4 dibawah ini.



a.



b.

Gambar 4. *Taper Hexagonal Tool*. a). Model 3D *Taper Hexagonal Tool*,
b). Model 2D *Taper Hexagonal Tool*.

3. Bahan Pengelasan (spesimen)

Spesimen yang akan digunakan sebagai eksperimen adalah Aluminium AA6061-T651. Dimana material ini sering digunakan dalam industri manufaktur, misalnya dalam pembuatan body kapal, kendaraan seperti mobil, body kereta api dan pembuatan pesawat terbang. Berikut gambar dari material AA6061-T651 yang ditunjukkan pada gambar 5 dibawah ini.



Gambar 5. Aluminium AA6061-T651

Adapun sifat-sifat dari material AA6061-T651 yang ditunjukkan pada tabel 1 dan 2 dibawah ini.

Tabel 1. Kandungan Sifat Kimia AA6061-T651

<i>Element</i>	<i>Precent (%)</i>
<i>Silicon (Si)</i>	0.50 – 0.90
<i>Magnesium (Mg)</i>	0.40 – 0.70
<i>Manganese + Chromium (Mn+Cr)</i>	0.12 – 0.50
<i>Manganese (Mn)</i>	0.0 – 0.50
<i>Iron (Fe)</i>	0.0 – 0.35
<i>Copper (Cu)</i>	0.0 – 0.30
<i>Chromium (Cr)</i>	0.0 – 0.30
<i>Zinx (Zn)</i>	0.0 – 0.20
<i>Others (Total)</i>	0.0 – 0.15
<i>Titanium (Ti)</i>	0.0 – 0.10
<i>Other (Each)</i>	0.0 – 0.05
<i>Aluminium (Al)</i>	<i>Balance</i>

Tabel 2. Kandungan Sifat Fisik dan Mekanik AA6061-T651

<i>Property</i>	<i>Value</i>
<i>Density</i>	2.70 Kg/m ³
<i>Melting Point</i>	605 °C
<i>Thermal Expansion</i>	24 x 10 ⁻⁶
<i>Modulus of Elasticity</i>	70 Gpa
<i>Thermal Conductivity</i>	188 W/m.K
<i>Electrical Resistivity</i>	0.034 x 10 ⁻⁶ Ω.m

D. Desain Eksperimen

Pada penelitian ini untuk desain eksperimen menggunakan metode *Taguchi Orthogonal Array*, yang bertujuan untuk mendesain percobaan untuk menganalisa data percobaan, dan juga digunakan untuk menentukan jumlah

eksperimen minimal yang didapat dan memberikan informasi pada faktor yang mempengaruhi parameter. Nilai untuk masing-masing parameter adalah:

1. Parameter Mesin
 - ✓ Kecepatan rotasi *tool* (KRT)
 - ✓ Kecepatan pengelasan (KP)
 - ✓ Sudut kemiringan *tool* (SKT)
 - ✓ Sudut Bahu Cekung (SBC)
2. Parameter *tool* FSW
 - ✓ *Tool Geometry Pin Hexagonal*

Berikut adalah desain OA yang ditunjukkan pada tabel 3 dibawah ini.

Tabel 3. Desain Eksperimen $L_{16} (4^4)$

SI. No	KRT (rpm)	KP (mm/min)	SKT (deg.)	SBC (deg.)	K-Tarik (R) (Kgf/mm ²)
1	765	24	2	2	
2	765	43	2,5	5	
3	765	65	3	8	
4	765	90	3,5	11	
5	1208	24	2,5	8	
6	1208	43	2	11	
7	1208	65	3,5	2	
8	1208	90	3	5	
9	1907	24	3	11	
10	1907	43	3,5	8	
11	1907	65	2	5	
12	1907	90	2,5	2	
13	3022	24	3,5	5	
14	3022	43	3	2	
15	3022	65	2,5	11	
16	3022	90	2	8	

E. Eksperimen

Pada proses ini dilakukan eksperimen pengelasan dengan menggunakan *Friction stir Welding* atau las gesek, dimana penyambungan atau pengelasan terjadi akibat panas gesekan akibat perputaran *tool* pada aluminium satu dengan aluminium yang lainnya. Dimana parameter yang dicari pada proses pengelasan ini adalah parameter mesin dan parameter *tool*.

F. Uji Tarik

Setelah dilakukan pengelasan, selanjutnya spesimen yang sudah di las akan diuji dengan menggunakan uji tarik, pengujian ini dilakukan terhadap hasil pengelasan dengan menggunakan metode FSW sesuai dengan standar yang digunakan dalam pengujian ini adalah standar yang sudah ditetapkan ASTM (*American Society for Testing and Material*), untuk mengetahui kekuatan dari suatu material atau spesimen tersebut. Berikut gambar mesin uji tarik yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.

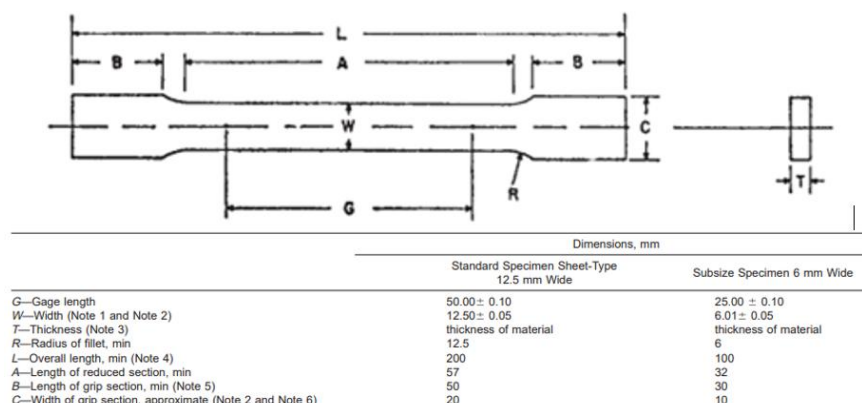


Gambar 6. Mesin Uji Tarik

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengambilan Data Uji Tarik

Setelah menyelesaikan proses pengelasan, tahap selanjutnya melibatkan serangkaian pengujian hasil las untuk memastikan kualitas dan kekuatan pengelasan dalam hal ini adalah Uji Kekuatan Tarik. Pengujian tarik, merupakan tahapan kritis dalam evaluasi kualitas sambungan las pada material logam, yang mencakup pemahaman mendalam terhadap performa mekanis dan integritas struktural. Dalam konteks pengelasan, penelitian ini fokus pada hasil proses FSW pada material AA6061-T651. Pengujian tarik bertujuan untuk mengevaluasi kekuatan Tarik dari sambungan las. Spesimen uji Tarik dibuat sesuai dengan standar ASTM B 557M – 02a seperti tergambar pada Gambar 7, pengujian ini diimplementasikan untuk memastikan bahwa persyaratan standar uji yang telah ditetapkan dapat terpenuhi. Panduan yang diberikan oleh standar ini secara jelas mencakup metode pengujian tarik untuk *Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products*, termasuk material AA6061-T651. Melalui penerapan standar ini, diharapkan bahwa data yang akurat mengenai performa tarik dari sambungan las pada material tersebut dapat diperoleh.



Gambar 7. Standar uji Tarik ASTM B 557M – 02a material AA6061-T651



Gambar 8. Mesin uji Tarik universal UH-300kNX

Proses pengujian K-Tarik, merek mesin uji Tarik yang digunakan adalah Universal UH-300kNX, sebagaimana terlihat pada Gambar 8. Dengan kekuatan uji maksimal mencapai 300 kN, fleksibilitas yang luas dalam menangani berbagai macam spesimen, dan kemampuan untuk menghasilkan data yang akurat mengenai kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan parameter lainnya, mesin ini memungkinkan pelaksanaan uji Tarik dengan tingkat kontrol yang tinggi. Data yang dihasilkan dapat mencakup hasil uji sesuai dengan standar internasional seperti ASTM, ISO, dan DIN.



Gambar 9. Spesimen uji Tarik ASTM B 557M – 02a



Gambar 10. Sampel patahan spesimen uji Tarik ASTM B 557M – 02a

Hasil manufaktur spesimen uji Tarik, sebagaimana terlihat pada Gambar 9, memberikan gambaran penting terkait dengan karakteristik tarik sambungan las. Proses manufaktur ini dilakukan dengan seksama untuk memastikan bahwa spesimen uji memenuhi persyaratan geometris dan dimensi yang telah ditetapkan dalam standar ASTM B 557M – 02a. Pentingnya hasil manufaktur ini terletak pada keakuratan geometri dan konsistensi material yang menjadi dasar utama dari pengujian tarik. Spesimen patahan hasil uji Tarik seperti terlihat pada Gambar 10 yang dihasilkan mencerminkan secara representatif kondisi sambungan las pada material AA6061-T651 yang akan dievaluasi. Dengan demikian, hasil pengujian tarik yang disajikan pada Tabel 4 dapat memberikan informasi yang relevan terkait dengan performa mekanis dan K-Tarik sambungan las pada material tersebut.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Kekuatan Tarik

Sl. No	KRT (rpm)	KP (mm/min)	SKT (deg.)	SBC (deg.)	K-Tarik (R) (Kgf/mm ²)
1.	765	24	2	2	18,510
2.	765	43	2,5	5	12,868
3.	765	65	3	8	15,973
4.	765	90	3,5	11	10,243
5.	1208	24	2,5	8	11,622
6.	1208	43	2	11	10,452
7.	1208	65	3,5	2	19,023
8.	1208	90	3	5	13,464
9.	1907	24	3	11	17,110
10.	1907	43	3,5	8	11,102
11.	1907	65	2	5	16,445
12.	1907	90	2,5	2	18,269
13.	3022	24	3,5	5	22,338
14.	3022	43	3	2	19,265
15.	3022	65	2,5	11	12,177
16.	3022	90	2	8	12,338

B. Metode ANOVA Taguchi

ANOVA (*Analysis of variance*) dilakukan menggunakan *software* Minitab 18 dan Karakteristik performa yang digunakan adalah *biggest is better* untuk uji kekuatan tarik, Setelah diketahui parameter atau masing-masing faktor yang signifikan. Kemudian mencari Persen kontribusi untuk mengetahui besar kontribusi masing-masing faktor terhadap respon.

Tabel 5. Hasil ANOVA untuk SN Ratio pada Kekuatan Tarik

Analysis of Variance for SN ratios

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
KRT	3	6,465	6,465	2,155	1,13	0,462
KP	3	14,891	14,891	4,964	2,60	0,227
SKT	3	6,028	6,028	2,009	1,05	0,484
SBC	3	37,022	37,022	12,341	6,45	0,080
Residual Error	3	5,738	5,738	1,913		
Total	15	70,144				

Pada Tabel 5 menunjukkan hasil **analisis varian (ANOVA)** untuk menguji pengaruh berbagai parameter proses FSW terhadap **respon kekuatan tarik**. Adapun parameter yang diuji:

- **KRT** = Kecepatan Rotasi *Tool* (rpm)
- **KP** = Kecepatan Pengelasan (mm/min)
- **SKT** = Sudut Kemiringan *Tool* (derajat)
- **SBC** = Sudut Bahu Cekung *Tool* (derajat)

Untuk memahami pengaruh masing-masing parameter proses terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan FSW pada material AA6061, dilakukan analisis varians (ANOVA) yang ditampilkan dalam Tabel 5. Tabel ini memuat beberapa kolom utama yang menjelaskan kontribusi dan signifikansi setiap faktor. Kolom "*Degrees of Freedom* (DF)" menunjukkan derajat kebebasan, sementara "*Sequential Sum of Squares* (Seq SS)" dan "*Adjusted Sum of Squares* (Adj SS)" menggambarkan variasi total dan yang telah disesuaikan akibat faktor tersebut. Kolom "*Contribution*" menyatakan persentase pengaruh tiap faktor terhadap respon. Nilai "*Mean Square* (Adj MS)" merupakan hasil pembagian antara Adj SS dan DF, dan menjadi dasar perhitungan "F-Value" untuk menilai kekuatan pengaruh faktor.

Terakhir, "P-Value" digunakan untuk menentukan signifikansi statistik, yaitu apakah suatu faktor memiliki pengaruh nyata terhadap respon yang diamati.

Analisis Tiap Faktor sebagai berikut:

1. SBC (Kontribusi: 52,8%)

- **Kontribusi paling besar** terhadap kekuatan tarik.
- F-Value = 6.45, P-Value = 0,080 → **tidak signifikan**.
- Artinya, **penyesuaian sudut baji atau parameter SBC sangat menentukan** kualitas sambungan FSW.

2. KP (Kecepatan Pengelasan) – Kontribusi: 21,23%

- F-Value = 2.60, P-Value = 0,227 → **tidak signifikan**.
- Kecepatan pengelasan juga merupakan parameter penting dalam pengendalian panas dan pencampuran material.

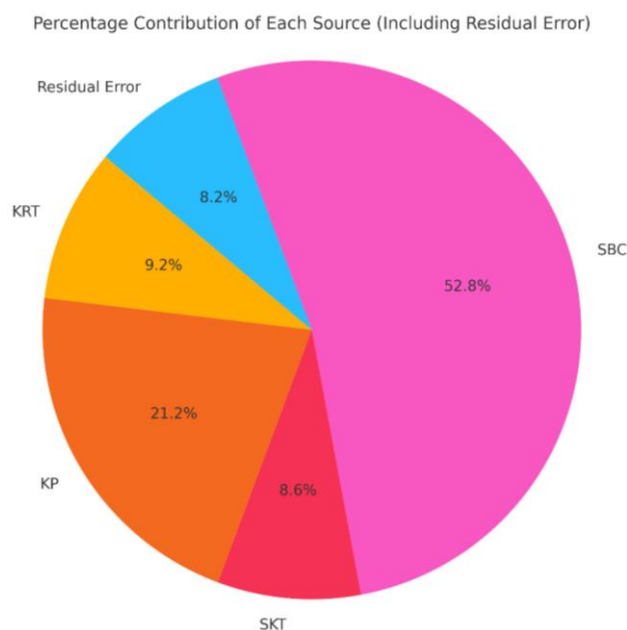
3. KRT (Kecepatan Rotasi Tool) – Kontribusi: 9,2%

- F-Value = 1,13, P-Value = 0,462 → **tidak signifikan**
- Semakin tinggi kecepatan rotasi, biasanya memperbesar panas gesekan, tetapi harus seimbang dengan parameter lain.

4. SKT (Sudut Kemiringan Tool) – Kontribusi: 8,6%

- F-Value = 1,05, P-Value = 0,484 → **tidak signifikan secara statistik** (karena $P > 0,05$).
- Artinya sudut kemiringan tool **tidak memberikan pengaruh yang kuat terhadap kekuatan tarik**, dalam rentang variasi yang diuji.

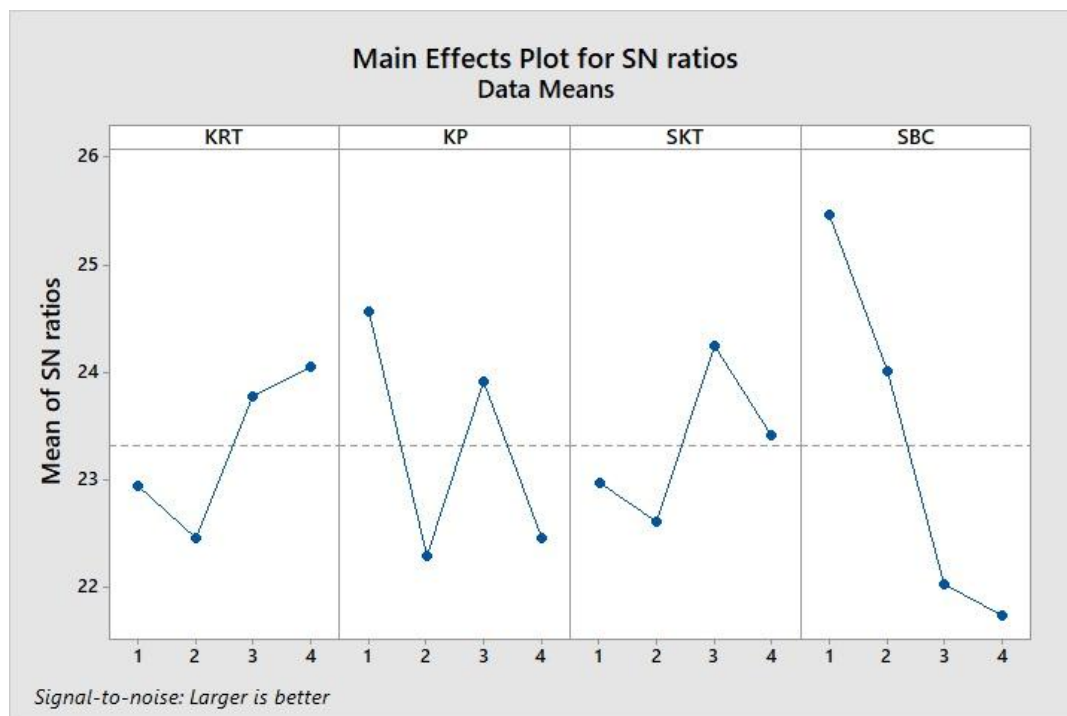
Diagram pie pada Gambar 4.5 (yang tidak disertakan, namun dijelaskan) menggambarkan persentase kontribusi masing-masing parameter proses terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan FSW pada material AA6061. Terlihat bahwa parameter SBC (Sudut Bahu Cekung) memberikan kontribusi paling besar, yaitu sebesar sekitar **52.8%**, diikuti oleh KP (Kecepatan Pengelasan) sebesar sekitar **21.2%** dan KRT (Kecepatan Rotasi Tool) sebesar sekitar **9.2%**. Sementara itu, SKT (Sudut Kemiringan Tool) hanya memberikan kontribusi kecil sebesar sekitar **8.6%**, dan error dalam percobaan sebesar sekitar **8.2%**, yang menunjukkan bahwa sebagian besar variasi dijelaskan oleh model, meskipun ada ruang untuk peningkatan. Hasil ini mengindikasikan bahwa pengaruh dominan terhadap kekuatan tarik berasal dari parameter SBC dan KP, yang perlu menjadi perhatian utama dalam pengaturan proses FSW, meskipun secara statistik pada tingkat signifikansi 0.05, tidak ada faktor yang menunjukkan signifikansi yang kuat berdasarkan P-value.



Gambar 10. Pie Diagram persen kontribusi masing-masing factor

Berikut adalah diagram pie terbaru yang menampilkan kontribusi masing-masing sumber variasi termasuk Residual Error, dengan ukuran teks label yang diperbesar untuk keterbacaan yang lebih baik. Dari grafik ini dapat dilihat bahwa:

SBC masih menjadi kontributor terbesar, diikuti oleh KP, kemudian KRT, SKT, dan Residual Error.



Gambar 11. Main effects plot untuk SN ratio pada parameter proses FSW terhadap K-Tarik

Pada Gambar 11 menunjukkan grafik *Main Effects Plot* untuk rasio signal-to-noise (SN ratio) terhadap kekuatan tarik (K-Tarik) pada proses *Friction Stir Welding* (FSW) material AA6061. Grafik ini menggambarkan pengaruh masing-masing parameter proses, yaitu kecepatan rotasi tool (KRT), kecepatan pengelasan (KP), sudut kemiringan tool (SKT), dan parameter SBC terhadap nilai rata-rata SN ratio dengan prinsip "*larger is better*", yang berarti semakin tinggi SN ratio, maka semakin baik dan stabil kualitas sambungan yang dihasilkan. Dari grafik terlihat bahwa KRT menunjukkan tren peningkatan SN ratio pada level tertinggi (level 4), menandakan kecepatan rotasi tinggi menghasilkan pengelasan yang lebih stabil. KP menunjukkan kenaikan tajam pada level 3, yang menjadi indikasi bahwa level ini merupakan kecepatan pengelasan yang paling efektif. Sementara itu, SKT memberikan perubahan SN ratio yang relatif kecil di antara level-levelnya, mengindikasikan bahwa pengaruh sudut kemiringan terhadap kekuatan tarik tidak dominan. Sebaliknya, SBC menunjukkan penurunan SN ratio yang signifikan dari level 1 ke level 4, menegaskan bahwa nilai optimal terletak pada level 1. Hasil ini konsisten dengan analisis ANOVA sebelumnya, di mana SBC merupakan faktor paling signifikan. Secara keseluruhan, grafik ini mendukung kesimpulan bahwa kombinasi optimal parameter proses terletak pada KRT level 4, KP level 1, SKT level 3, dan SBC level 1 untuk menghasilkan kekuatan tarik maksimum pada sambungan FSW AA6061.

• Analisis dan Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis varians (ANOVA), masing-masing parameter proses *Friction Stir Welding* (FSW) menunjukkan kontribusi yang berbeda terhadap kekuatan tarik material AA6061. Parameter SBC (Sudut Bahu Campuran) memberikan kontribusi tertinggi, yaitu sebesar **52.8%**, yang berarti lebih dari separuh variasi kekuatan tarik dipengaruhi oleh parameter ini. Selanjutnya, KP (Kecepatan Pengelasan) memberikan kontribusi sebesar **21.2%** diikuti oleh KRT (Kecepatan Rotasi Tool) sebesar **9.2%**, dan SKT (Sudut Kemiringan Tool) hanya **8.6%**, yang secara statistik tidak signifikan ($P\text{-value} > 0,05$). Proporsi error yang sangat kecil (8,22%) menunjukkan bahwa model eksperimen memiliki reliabilitas tinggi dalam menjelaskan pengaruh faktor terhadap respon.

Dari hasil grafik main effects plot, kombinasi level parameter yang menghasilkan nilai SN ratio tertinggi—dengan prinsip "larger is better" adalah:

- KRT level 4
- KP level 1
- SKT level 3
- SBC level 1

Kombinasi ini dapat dianggap sebagai parameter proses optimum, karena menghasilkan kondisi dengan kekuatan tarik maksimum yang ditunjukkan oleh puncak SN ratio. SBC pada level 1 sangat dominan dalam meningkatkan kekuatan tarik, yang mungkin disebabkan oleh distribusi panas dan tekanan lebih merata di daerah las pada konfigurasi tersebut. KP pada level 3 memberikan keseimbangan antara waktu proses dan pembentukan sambungan, sementara KRT pada level 4 menunjukkan bahwa rotasi tool yang lebih tinggi dapat meningkatkan agitasi material, sehingga memperbaiki ikatan antar permukaan. Meskipun kontribusi SKT rendah, pemilihan level 3 tetap mengacu pada titik dengan SN ratio terbaik secara keseluruhan.

Dengan demikian, pemilihan parameter proses optimum tidak hanya didasarkan pada kontribusi terbesar saja, tetapi juga memperhatikan tren pada main *effects plot* untuk memaksimalkan respon. Pendekatan ini sangat penting untuk merancang proses FSW yang konsisten dan menghasilkan sambungan berkekuatan tinggi pada material AA6061.

IV. KESIMPULAN & SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan tentang Pengaruh Parameter Proses *Friction Stir Welding* (FSW) Pada Sambungan Material Aluminium Alloy Aa6061-T651 Terhadap Kekuatan Tarik, maka dapat diambil kesimpulan seperti berikut :

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter proses Friction Stir Welding (FSW) berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik sambungan material AA6061. Dari grafik main effects plot, diketahui bahwa variasi level parameter seperti kecepatan rotasi *tool* (KRT), kecepatan pengelasan (KP), sudut kemiringan tool (SKT), dan konfigurasi sudut bahu campuran (SBC) menghasilkan perubahan nyata pada nilai SN ratio, dengan tren terbaik tercapai pada kombinasi level tertentu. Peningkatan kecepatan rotasi dan kecepatan pengelasan tertentu dapat memperbaiki pencampuran material di zona adukan, sementara SBC yang optimal memberikan tekanan dan distribusi panas merata. Oleh karena itu, pemilihan kombinasi parameter proses yang tepat menjadi kunci untuk memperoleh sambungan FSW yang kuat dan berkualitas.
2. Analisis ANOVA menunjukkan bahwa masing-masing parameter FSW memberikan kontribusi yang berbeda terhadap kekuatan tarik sambungan. Parameter SBC memberikan kontribusi tertinggi sebesar 52,8%, menunjukkan bahwa konfigurasi bahu tool merupakan faktor dominan dalam menentukan kualitas sambungan. Diikuti oleh KP (21,2%) dan KRT (9,2%), yang turut memberikan pengaruh signifikan terhadap pembentukan zona adukan dan laju perpindahan panas. Sebaliknya, SKT hanya memberikan kontribusi 8,6% dan tidak signifikan secara statistik, sehingga perannya relatif kecil dibandingkan parameter lainnya. Hal ini menegaskan bahwa pengendalian parameter SBC dan KP harus menjadi fokus utama dalam proses optimasi FSW untuk meningkatkan kekuatan tarik.

B. Saran

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil penelitian serta kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut :

1. Menggunakan Untuk memperoleh kekuatan tarik maksimum pada pengelasan FSW material AA6061, disarankan menggunakan parameter optimum yang telah terbukti menghasilkan nilai SN ratio tertinggi, yaitu KRT level 4, KP level 3, SKT level 3, dan SBC level 1. Perlu dilakukan eksperimen lanjutan pada variasi material dan bentuk sambungan berbeda untuk menguji kestabilan kombinasi parameter ini.

2. Disarankan agar penelitian lanjutan lebih memfokuskan pada eksplorasi bentuk dan dimensi bahu tool (SBC) serta kecepatan pengelasan (KP), karena dua parameter ini terbukti memiliki kontribusi terbesar terhadap peningkatan kekuatan tarik. Selain itu, pengaruh parameter yang tidak signifikan seperti SKT sebaiknya dipertimbangkan kembali jika ingin disederhanakan dalam rancangan proses produksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh hormat, penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo (Umsida), khususnya Program Studi Teknik Mesin. Penulis juga ingin menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada keluarga tercinta atas doa, motivasi, dan dukungan emosional yang tak pernah putus selama proses penyelesaian karya ilmiah ini. Apresiasi yang tinggi juga penulis berikan kepada rekan-rekan mahasiswa yang telah berkontribusi dan memberikan saran serta dukungan moral yang sangat berarti selama proses penelitian ini berlangsung.

REFERENSI

1. Al-kubaisy, M. M. (2016). Optimization of Friction Stir Welding Process Parameters of Dissimilar AA2024-T3 T3 and AA7075-T73 Aluminum Alloys Alloy by Using Taguchi Method. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 12(1), 100–109.
2. Emamian, S., Awang, M., Yusof, F., Hussain, P., Meyghani, B., & Zafar, A. (2019). The Effect of Pin Profiles and Process Parameters on Temperature and Tensile Strength in Friction Stir Welding of AL6061 Alloy. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 15–37. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9041-7_2
3. Faruq, R. A. Y., Jokosisworo, S., & Hadi, E. S. (2017). Analisa Pengaruh Perbedaan Diameter Pin Tool Terhadap Kekuatan Tarik, Impak, Dan Mikrografi Pada Aluminium 6061 Dengan Metode Pengelasan Friction Stir Welding (FSW). *Jurnal Teknik Perkapalan*, 5(2), 421–430.
4. Kesharwani, R. K., Panda, S. K., & Pal, S. K. (2014). Multi Objective Optimization of Friction Stir Welding Parameters for Joining of Two Dissimilar Thin Aluminum Sheets. *Procedia Materials Science*, 6(Icmpc), 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.022>
5. Murali Krishna, P., Ramanaiah, N., & Prasada Rao, K. (2013). Optimization of process parameters for friction Stir welding of dissimilar Aluminum alloys (AA2024 -T6 and AA6351-T6) by using Taguchi method. *International Journal of Industrial Engineering Computations* 4(1), 71–80. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2012.011.002>
6. Salindeho, R. D., Soukoto, J., & Poeng, R. (2018). Pemodelan pengujian tarik untuk menganalisis sifat mekanik material. *Jurnal J-Ensitem*, 3(1), 1–11.
7. Setyawan, P. E., Irawan, Y. S., & Suprpto, W. (2014). Kekuatan Tarik Dan Porositas Hasil Sambungan Las Gesek Aluminium 6061 Dengan Berbagai Suhu Aging. *Rekayasa Mesin*, 5(2), pp.141-148. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm>
8. Sukmana, I., & Sustiono, A. (2016). Pengaruh Kecepatan Putar Indentor Las Gesek Puntir (Friction Stir Welding) Terhadap Kualitas Hasil Pengelasan Alumunium 1100-H18. *Mechanical*, 7, 15–19. <https://doi.org/10.23960/mech.v7.i1.201603>