

Transient Thermal Analysis of Friction Stir Spot Welding of ST-35 Steel: The Effect of Rotational Speed and Friction Pressure Variations on Temperature Distribution

[Transient Thermal Analysis pada Friction Stir Spot Welding Baja ST-35: Pengaruh Variasi Kecepatan Putar dan Tekanan Gesek Terhadap Distribusi Suhu]

Resandrya Krisna Brata Wisesa¹⁾, A'rasy Fahrudin^{*2)}

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

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

*Email Penulis Korespondensi: arasyfahrudin@umsida.ac.id

Abstract. This study investigates the thermal response of the Friction Stir Welding (FSW) process on ST-35 steel using ANSYS-based transient thermal simulation and parameter optimization through the Taguchi method and Analysis of Variance (ANOVA). The studied parameters include tool rotational speed (RPM), axial force, initial surface temperature, and mesh type. Maximum temperature (T_{max}) is used as the main indicator, with a reference of 30% of the melting temperature of ST-35 steel (± 450 °C). The results show that RPM has the most significant influence on T_{max} . Mean-based Taguchi analysis identifies the optimal condition at 1050 RPM, 8000 N axial force, 60 °C initial temperature, and hexahedral meshing, yielding a predicted mean T_{max} of 348.677 °C. ANOVA confirms the dominance of RPM with a 92.85% contribution

Keywords - Friction Stir Welding; ST-35 Steel; Transient Thermal Analysis; Taguchi Method; Maximum Temperature

Abstrak. Penelitian ini menganalisis respons termal proses Friction Stir Welding (FSW) pada baja ST-35 menggunakan simulasi Transient Thermal Analysis berbasis ANSYS serta optimasi parameter dengan metode Taguchi dan Analysis of Variance (ANOVA). Parameter yang dikaji meliputi kecepatan putar tool (RPM), gaya aksial, temperatur permukaan awal, dan jenis meshing. Temperatur maksimum (T_{max}) digunakan sebagai indikator utama dengan acuan 30% titik lebur ST-35 (± 450 °C). Hasil menunjukkan bahwa peningkatan RPM memberikan pengaruh paling signifikan terhadap T_{max} . Analisis Taguchi berbasis nilai rata-rata (mean) mengidentifikasi kombinasi optimal pada RPM 1050, gaya aksial 8000 N, temperatur 60 °C, dan meshing heksagonal dengan prediksi mean T_{max} sebesar 348,677 °C. ANOVA menegaskan dominasi RPM dengan kontribusi 92,85%.

Kata Kunci - Friction Stir Welding; Baja ST-35; Transient Thermal Analysis; Metode Taguchi; Temperatur Maksimum

I. PENDAHULUAN

Friction Stir Welding (FSW) merupakan metode penyambungan *solid-state* yang unggul karena mampu menghasilkan sambungan dengan distorsi termal rendah, struktur mikro stabil, dan minim cacat dibandingkan pengelasan berbasis peleburan. Proses ini memanfaatkan panas akibat friksi dan deformasi plastis tanpa melewati fase cair, sehingga lebih efektif dalam mengendalikan input panas, khususnya pada baja karbon rendah [1], [2]. Berbagai studi menunjukkan bahwa FSW mampu menekan pembentukan *Heat Affected Zone* (HAZ) yang berlebihan dan mengurangi risiko degradasi mikrostruktur yang umum terjadi pada *fusion welding* [3].

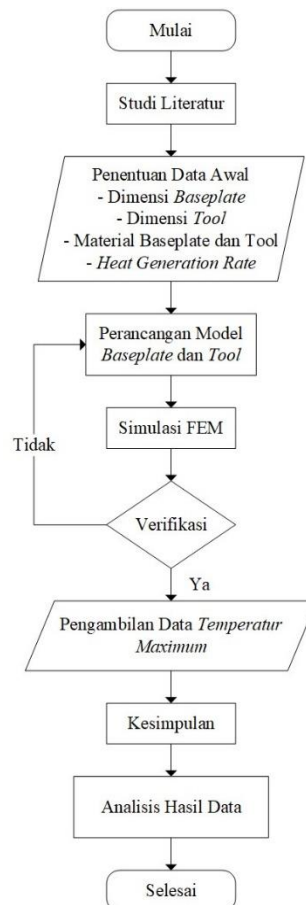
Kualitas sambungan FSW sangat dipengaruhi oleh parameter proses, terutama kecepatan putar dan tekanan gesek, yang menentukan distribusi panas, aliran material, serta stabilitas stir zone. Variasi parameter yang tidak terkendali dapat menyebabkan ketidakstabilan termal dan penurunan sifat mekanik sambungan [4], [5], [6]. Hal ini menjadi krusial pada baja ST-35 yang banyak digunakan dalam aplikasi struktural, namun sensitif terhadap fluktuasi suhu tinggi, sehingga dinamika termal selama proses FSW berperan langsung terhadap kekuatan dan kekerasan sambungan [7].

Selain parameter proses, karakteristik tool juga berperan penting dalam pembentukan distribusi suhu. Tool berbahan H-13 terbukti memiliki stabilitas termal dan ketahanan aus yang baik, serta mampu menghasilkan distribusi panas yang lebih merata pada FSW baja [8], [9]. Pemodelan distribusi suhu berbasis analisis struktur *transien* dinilai lebih representatif karena mampu menangkap evolusi termal secara *real-time* dan mendukung optimasi parameter proses untuk meminimalkan cacat serta degradasi tool [10], [11], [12].

Meskipun demikian, penelitian kuantitatif yang secara khusus mengkaji interaksi kecepatan putar dan tekanan gesek terhadap distribusi suhu pada proses FSW baja ST-35 masih terbatas. Oleh karena itu, studi ini menjadi penting

untuk memberikan kontribusi empiris dalam peningkatan kualitas dan efisiensi proses pengelasan *solid-state* pada industri manufaktur logam.

II. METODE



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan numerik berbasis *Transient Thermal Analysis* untuk menganalisis respons termal proses *Friction Stir Welding* (FSW) pada baja ST-35. Geometri baseplate dan tool silinder berbahan H-13 dimodelkan menggunakan *Autodesk Inventor*, kemudian diimpor ke *ANSYS Student Edition* untuk proses simulasi. Dimensi utama komponen ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Data Geometri

Komponen	Material	Dimensi	Spesifikasi (mm)
Baseplate	ST-35	Panjang	75
		Lebar	75
		Tebal	6
Tool Silinder	H13	Diameter Tool	18
		Diameter Pin	6
		Panjang Pin	4,5

Pemodelan pembangkitan panas dilakukan dengan mempertimbangkan tiga zona kontak utama, yaitu bagian bawah shoulder (Q_1), selimut pin (Q_2), dan ujung pin (Q_3). Dengan asumsi tool silinder tanpa *tilt angle* serta mekanisme *sliding-sticking* yang direpresentasikan oleh *slip factor* (δ), maka laju pembangkitan panas dirumuskan sebagai berikut:

Q_1 dari bagian bawah permukaan *shoulder* dinyatakan dengan:

$$Q_{1total} = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \tau_{sliding} \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) + \delta \frac{2}{3} \pi \tau_{sticking} \omega (R_{shoulder}^3 - R_{pin}^3) \quad (1)$$

Q_2 dari selimut (dinding samping) pin tool dihitung sebagai:

$$Q_{2total} = (1 - \delta) 2\pi \tau_{contact} \omega R_{pin}^2 H_{pin} + \delta 2\pi \tau_{contact} \omega R_{pin}^2 H_{pin} \quad (2)$$

Sedangkan Q_3 yang berasal dari permukaan bawah ujung pin dirumuskan sebagai:

$$Q_{3total} = (1 - \delta) \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} R_{pin}^3 + \delta \frac{2}{3} \pi \omega \tau_{contact} R_{pin}^3 \quad (3)$$

Desain eksperimen disusun secara sistematis dengan memvariasikan kecepatan putar tool (RPM), gaya aksial (N), temperatur permukaan awal, dan jenis elemen *meshing* sebagaimana ditampilkan pada **Tabel 2**. Variasi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing parameter terhadap temperatur maksimum (T_{max}) sebagai indikator utama respons termal.

Tabel 2 Desain Eksperimen

Level	Kecapatan Tool (RPM)	Gaya Aksial (N)	Temp Permukaan °C	Jenis Element Meshing
1	600	5000	8	Heksagonal (H)
2	750	6000	29	
3	900	7000	40	Tetrahedral (T)
4	1050	8000	60	

Simulasi dilakukan dengan menyelesaikan persamaan konduksi panas tak tunak berbasis waktu pada modul *Transient Thermal*. Kondisi batas berupa konveksi dan radiasi diterapkan pada permukaan benda kerja, sementara *heat flux* hasil perhitungan Q_1 , Q_2 , dan Q_3 diinput pada area kontak tool. Ukuran mesh ditetapkan 2 mm dengan dua tipe elemen, yaitu heksagonal dan tetrahedral, untuk membandingkan stabilitas numerik terhadap gradien temperatur.

Properti material ST-35 didefinisikan sesuai **Tabel 3** dan dimodelkan menggunakan pendekatan konstitutif Johnson–Cook guna merepresentasikan perilaku material pada temperatur tinggi. Hasil simulasi berupa distribusi temperatur dan nilai T_{max} selanjutnya dianalisis menggunakan metode Taguchi berbasis nilai rata-rata (mean) serta Analysis of Variance (ANOVA) untuk menentukan kombinasi parameter optimal dan kontribusi relatif masing-masing faktor terhadap respons termal proses FSW.

Tabel 3 Properti Material

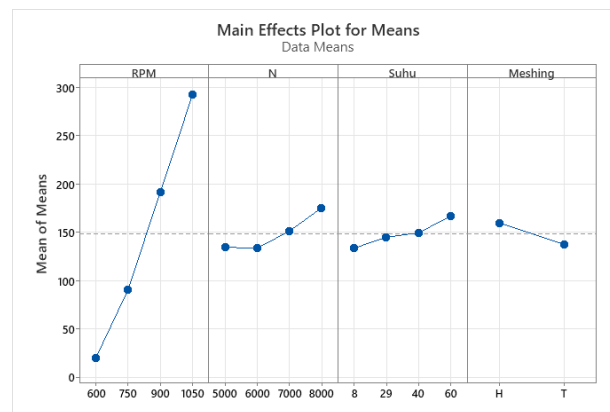
Property	Value
Density	7850 kg/m ³
Specific Heat	460 J/kg·°C
Thermal Conductivity	50 W/m·°C
Melting Temperature	1500 °C
Tensile Yield Strength	2.35E+08 Pa
Young's Modulus	2.07E+11 Pa

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi FSW dengan Ansys Transient Thermal

Hasil simulasi *Friction Stir Welding* (FSW) menunjukkan bahwa temperatur maksimum (T_{max}) sangat dipengaruhi oleh variasi parameter proses dan menjadi indikator utama respons termal material selama pengelasan. Perubahan parameter proses secara langsung memengaruhi distribusi panas dan tingkat deformasi plastis, sehingga nilai T_{max} digunakan sebagai representasi kondisi termomekanik yang menentukan kestabilan aliran material pada zona adukan.

Pada baja ST 35 dengan titik lebur sekitar 1500 °C, kondisi termal ideal berada pada kisaran 30% titik lebur, yaitu sekitar 450 °C, guna memastikan material cukup lunak tanpa risiko degradasi mikrostruktur. Oleh karena itu, data T_{max} hasil simulasi dianalisis menggunakan metode Taguchi berbasis nilai rata-rata (mean) dengan mengevaluasi kedekatan nilai T_{max} terhadap temperatur referensi tersebut, sehingga kombinasi parameter proses yang paling mendekati kondisi optimal dapat diidentifikasi secara sistematis.



Gambar 2 Means Tmax

Berdasarkan analisis Taguchi berbasis nilai rata-rata (mean) yang diperoleh dari main effects plot, kombinasi parameter optimal ditetapkan pada 1050 rpm, 8000 N, suhu 60 °C, dan meshing tipe H, yang menghasilkan nilai prediksi mean Tmax sebesar 348,677 °C. Nilai ini merupakan hasil langsung dari kecenderungan grafik Taguchi, di mana level kecepatan putar tertinggi memberikan kontribusi dominan terhadap peningkatan temperatur maksimum, diikuti oleh gaya aksial dan suhu awal sebagai faktor pendukung, sementara pengaruh meshing relatif minimal. Meskipun nilai mean hasil prediksi tersebut masih berada di bawah temperatur referensi ideal 450 °C (30% titik lebur ST 35), kombinasi ini merepresentasikan kondisi termal tertinggi dan paling stabil yang dapat dicapai dalam rentang variasi parameter yang diteliti.

Tabel 4 Hasil Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
N (rpm)	3	342141	92,85%	342141	114047	275,98	0,000
F	3	9100	2,47%	9100	3033	7,34	0,002
Suhu	3	4604	1,25%	4604	1535	3,71	0,028
Meshing	1	3977	1,08%	3977	3977	9,62	0,005
Error	21	8678	2,35%	8678	413		
Total	31	368500	100,00%				

Pengaruh masing-masing parameter terhadap temperatur maksimum (Tmax) dianalisis menggunakan Analysis of Variance (ANOVA) untuk mengkuantifikasi kontribusi relatif setiap faktor. Hasil analisis menunjukkan bahwa kecepatan putar merupakan parameter yang paling dominan, dengan kontribusi sebesar 92,85%, menegaskan bahwa kecepatan putar tool menjadi mekanisme utama pembangkitan panas melalui peningkatan energi gesek dan deformasi plastis selama proses FSW. Parameter gaya aksial memberikan kontribusi sebesar 2,47%, diikuti oleh suhu awal sebesar 1,25% dan meshing sebesar 1,08%, yang menunjukkan bahwa ketiga faktor tersebut berperan sebagai pengendali sekunder terhadap Tmax. Kontribusi error yang rendah (2,35%) mengindikasikan bahwa variasi Tmax telah terjelaskan dengan baik oleh parameter yang diteliti, sehingga hasil ANOVA ini secara konsisten menegaskan dominasi kecepatan putar dalam pengendalian respons termal proses FSW.

VII. SIMPULAN

Simulasi Friction Stir Welding (FSW) baja ST 35 menggunakan ANSYS Transient Thermal menunjukkan bahwa temperatur maksimum (Tmax) sangat dipengaruhi oleh variasi parameter proses dan merepresentasikan respons termal material selama pengelasan. Analisis Taguchi berbasis nilai rata-rata (*mean*) dengan acuan temperatur ideal sekitar 450 °C (30% titik lebur ST 35) mengidentifikasi kombinasi parameter 1050 rpm, 8000 N, suhu 60 °C, dan *meshing* tipe H sebagai kondisi termal paling mendekati target dalam rentang variasi yang diteliti, dengan nilai prediksi mean Tmax sebesar 348,677 °C. Hasil Analysis of Variance (ANOVA) menunjukkan bahwa kecepatan putar merupakan parameter paling dominan, dengan kontribusi sebesar 92,85%, sedangkan N, suhu awal, dan meshing memberikan pengaruh sekunder. Temuan ini menegaskan bahwa pengendalian kecepatan putar menjadi faktor kunci dalam optimasi respons termal proses FSW baja ST 35.

REFERENSI

- [1] S. Suryadi, R. Firmansyah, and A. Budiman, "Analisis temperatur dan distorsi pada proses friction stir welding baja karbon rendah," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 115–124, 2021.
- [2] H. S. Nugroho and L. W. Santosa, "Pengaruh variasi putaran tool terhadap sifat mekanik dan struktur mikro hasil pengelasan FSW baja," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 10, no. 1, pp. A15–A20, 2021.
- [3] R. Apriyanto and M. F. Hakim, "Studi eksperimental distribusi suhu pada proses friction stir welding menggunakan thermocouple multi-titik," *SINERGI*, vol. 26, no. 4, pp. 379–388, 2022.
- [4] D. Widodo and A. R. Prasetyo, "Analisis numerik pengaruh tekanan gesek pada FSW terhadap outcome termal bahan baja," *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, vol. 9, no. 2, pp. 45–54, 2023.
- [5] S. Hidayat and M. R. Latif, "Modeling dan simulasi temperatur FSW pada baja karbon menggunakan metode elemen hingga," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 21–29, 2022.
- [6] F. A. Nurcahyo and S. R. Firmansyah, "Pengaruh variasi rotational speed terhadap temperatur dan input energi pada FSW baja," *JTTM (Jurnal Teknologi dan Teknik Mesin)*, vol. 4, no. 1, pp. 55–64, 2022.
- [7] M. Mulyadi, R. Firdaus, I. Iswanto, and M. N. Rizki, "Pengaruh parameter proses friction stir welding dengan material aluminium alloy AA6061-T651 terhadap distorsi dan kekerasan," *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, vol. 11, no. 2, Dec. 2022, doi: 10.24127/trb.v11i2.2171.
- [8] A. H. Ramadhan, T. Permana, and W. P. Santoso, "Karakterisasi termal hasil friction stir welding pada baja ST-series menggunakan infrared thermography," *Jurnal Ilmiah Politeknik Negeri Semarang*, vol. 11, no. 2, pp. 112–120, 2021.
- [9] S. Prabowo and A. W. Hidayah, "Analisis distribusi termal dan deformasi awal pada FSW menggunakan model transient," *Jurnal Teknika*, vol. 18, no. 3, pp. 245–256, 2023.
- [10] M. Kanzul and F. Rochman, "Evaluasi pembentukan panas pada friction stir welding terhadap kualitas sambungan baja," *ROTASI*, vol. 24, no. 1, pp. 35–42, 2022.
- [11] L. Prasetya and M. Faizal, "Simulasi elemen hingga pada friction stir welding baja: fokus pada kecepatan putar dan gaya aksial," *JETI (Jurnal Elektro dan Teknologi Industri)*, vol. 11, no. 4, pp. 267–276, 2022.
- [12] T. S. Rachman and B. R. Purwanto, "Optimasi parameter proses FSW baja karbon melalui pendekatan respons termal," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 17, no. 2, pp. 129–138, 2021.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.