

Analisis Sifat Mekanik Aluminium 6061 dengan Variasi Temperatur *Reforming* pada *Sidewall* Kereta

Alfi Tranggono Agus Salim¹, Mochamad Reza Arimurti², Anisah Nurul Hidayati³, Yanfirga Setyawan Putra Sinaga⁴, Regita Aulia⁵, Pungky Dhikha Sanjaya⁶, Dimas Jauza Nirwana⁷

Perkeretaapian, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun, Kota Madiun, Jawa Timur, Indonesia^{1,2,3,4,5,7},
Divisi Pengelolaan Kualitas, Industri Manufaktur Kereta Api, Jawa Timur, Indonesia⁶

Corresponding Author: alfitranggono@pnm.ac.id

ABSTRAK

Proses *reforming* dilakukan untuk mengurangi distorsi pada *sidewall* Kereta. Akan tetapi, temperatur perlakuan termal yang tidak tepat selama *reforming* dapat menurunkan sifat mekanik bahan. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi temperatur *reforming* terhadap sifat mekanik aluminium 6061 yang digunakan pada *sidewall* Kereta. Spesimen aluminium 6061 setebal 8 mm diperlakukan pada tiga rentang temperatur *reforming*: 125–150 °C, 175–200 °C, dan 225–250 °C. Hasil *tensile test* menunjukkan penurunan *yield strength* dari 185,26 MPa menjadi 94,17 MPa pada 225–250 °C, dan penurunan *ultimate tensile strength* dari 248 MPa menjadi 159,33 MPa. Sementara itu, *elongation* meningkat dari 15,14% menjadi 20,58%. *Bending test* memperlihatkan penurunan tegangan tekuk pada temperatur terendah. Nilai kekerasan Vickers tertinggi dicapai pada 175–200 °C. Berdasarkan keseluruhan hasil, temperatur *reforming* optimum diperoleh pada 175–200 °C karena memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan dan daktilitas. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam penentuan parameter ideal proses *reforming* aluminium 6061 yang digunakan pada *sidewall* untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi.

Kata Kunci: Aluminium 6061, *Reforming*, Sifat Mekanik, *Sidewall*

ABSTRACT

The reforming process was carried out to reduce distortion on the train sidewall. However, improper thermal treatment temperature during reforming can decrease the mechanical properties of the material. This study analyzes the effect of reforming temperature variations on the mechanical properties of Aluminum 6061 used in the train sidewall. Aluminum 6061 specimens with a thickness of 8 mm were treated at three reforming temperature ranges: 125–150 °C, 175–200 °C, and 225–250 °C. The tensile test results showed a decrease in yield strength from 185.26 MPa to 94.17 MPa at 225–250 °C, and a decrease in ultimate tensile strength from 248 MPa to 159.33 MPa. Meanwhile, elongation increased from 15.14% to 20.58%. The bending test revealed a reduction in bending stress at the lowest temperature range. The highest Vickers hardness value was achieved at 175–200 °C. Based on the overall results, the optimum reforming temperature was obtained at 175–200 °C, as it provides the best balance between strength and ductility. This study contributes to determining the ideal parameters for the reforming process of Aluminum 6061 used in the sidewall, aiming to improve production quality and efficiency.

Keywords: Aluminum 6061, Reforming, Mechanical Properties, Sidewall

1 PENDAHULUAN

Kereta Cepat (*High-Speed Rail/HSR*) didefinisikan secara operasional sebagai sistem transportasi rel yang mampu mencapai kecepatan minimum 250 km/jam

pada jalur khusus yang dimodifikasi atau 200 km/jam pada jalur konvensional yang ditingkatkan [1]. Sistem ini bukan hanya peningkatan kecepatan inkremental, melainkan representasi evolusi integral dalam rekayasa transportasi, melibatkan optimasi ekstensif



pada tiga komponen utama: sarana (*rolling stock*), prasarana (*infrastructure*), dan sistem operasi.

Industri manufaktur kereta api, saat ini sedang mengembangkan kereta. Salah satu komponen utama yang dihasilkan adalah struktur *sidewall*. Pembuatan *sidewall* menggunakan Aluminium 6061 karena kemudahan pembentukannya, konduktivitas tinggi, dan ketahanan korosi [2], [3]. Dalam proses manufaktur, perakitan *sidewall* dilakukan dengan menggunakan teknik pengelasan [4]. Pengamatan yang dilakukan di industri mengungkapkan adanya distorsi atau deformasi pada spesimen yang dilas [5]. Distorsi diidentifikasi sebagai masalah kritis karena dampaknya terhadap penundaan pembuatan dan peningkatan biaya produksi *sidewall* kereta [6], [7]. Untuk mengurangi distorsi, proses *reforming* diperlukan untuk mengembalikan dimensi *sidewall* [8]. Namun, temperatur perlakuan termal yang tidak tepat selama *reforming* dapat menurunkan sifat mekanik bahan sehingga diperlukan pemilihan parameter temperatur yang sesuai [9], [10].

Dalam penelitian sebelumnya mengenai efek variasi temperatur *reforming* setelah pengelasan GMAW pada kekuatan tarik dan metalografi Aluminium 6061 setebal 4 mm, dengan variasi temperatur 100–150 °C, 150–200 °C, dan 200–250 °C. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa temperatur *reforming* yang lebih tinggi menghasilkan fase presipitasi yang lebih besar, yang mengakibatkan penurunan kekuatan tarik material [11]. Penelitian terdahulu lainnya dilakukan pada aluminium 6061 menggunakan metode *precipitation hardening* pada temperatur 450°C selama 30 menit, diikuti dengan artificial aging pada temperatur yang bervariasi 150°C, 190°C, dan 230°C dengan waktu tahan 5 jam. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa temperatur yang lebih tinggi menghasilkan jumlah presipitasi yang lebih besar dan batas butir yang lebih rapat [12].

Pada penelitian ini, *research gap* berupa kesenjangan teoretis (*theoretical gap*) terletak pada perbedaan objek penelitian, yaitu dari proses *reforming* hasil pengelasan GMAW pada aluminium 6061 dengan ketebalan 4 mm menjadi proses *reforming* pada *raw material* aluminium 6061 dengan ketebalan 8 mm, yang diuji melalui *tensile test*, *bending test*, dan *Vickers hardness test*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sifat mekanik aluminium 6061 setelah

menjalani proses *reforming*, dan menentukan temperatur *reforming* yang efektif mengatasi distorsi ditinjau dari hasil pengujian yang diperoleh.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi terhadap tantangan industri, khususnya dalam menentukan parameter temperatur *reforming* untuk produksi *sidewall* kereta. Selain itu, temuan ini digunakan sebagai referensi untuk proses *reforming* aluminium 6061 pada *sidewall* kereta, dan untuk memperluas pengetahuan dan keahlian teknis dalam aplikasi rekayasa di industri manufaktur kereta api.

2 KAJIAN LITERATUR

2.1 *Sidewall* Kereta

Sidewall pada kereta api berfungsi membentuk struktur dan kekuatan pada badan kereta dan menopang atap kereta [13]. *Sidewall* kereta berbahan dasar aluminium 6061 memiliki karakteristik ringan dan tahan terhadap korosi sehingga diaplikasikan untuk kereta cepat [5]. Gambar 1 menunjukkan struktur *sidewall* dari kereta.



Gambar 1. *Sidewall* Kereta

Sumber: [5]

2.2 Aluminium 6061

Paduan aluminium 6xxx adalah logam ringan yang mempunyai sifat tahan korosi dan jenis logam *heat treatable* [14]. Aluminium 6061 memiliki komposisi kandungan kimia utama Aluminium (Al), Silikon (Si), dan Magnesium (Mg) dan memiliki minimal *tensile strength* sebesar 206 MPa, minimal *yield strength* sebesar 110 MPa, dan *elongation* minimal 10% [15], [16].

2.3 Distorsi

Perubahan bentuk material yang disebabkan perlakuan panas pengelasan atau proses manufaktur yang

meninggalkan tekanan pada material selama pendinginan sehingga menyebabkan lengkungan [17].

2.4 Reforming

Proses *reforming* adalah perlakuan panas untuk memperbaiki bentuk material yang terdistorsi. Proses *reforming* mampu meningkatkan kualitas material [18].

2.5 Tensile Test

Tensile test dilakukan dengan menarik material, dengan pemberian beban statis yang meningkat secara perlahan hingga patah sehingga dihasilkan hubungan tegangan dan regangan yang menghasilkan data *yield strength* (MPa), *elongation* (%), dan *ultimate tensile strength* (MPa) [19].

2.6 Bending Test

Bending test dilakukan untuk menilai ketahanan material terhadap deformasi plastis ketika menerima beban tekuk sehingga mendapatkan data kekuatan tekuk (MPa) [20].

2.7 Vickers Hardness Test

Vickers hardness test dilakukan untuk menganalisis sifat mekanik dari *material* dengan memberikan beban konstan, berupa indenter piramida intan pada permukaan spesimen yang rata kemudian luas dari indentasinya diukur dengan data nilai kekerasan (HV) [21].

2.8 Hipotesis

Hipotesis diuji secara statistik menggunakan metode ANOVA sehingga dihasilkan H_0 penelitian ini adalah peningkatan temperatur pada proses *reforming* tidak berpengaruh terhadap sifat mekanik material, sedangkan H_1 adalah peningkatan temperatur pada proses *reforming* berpengaruh terhadap sifat mekanik material.

3 METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 4 bulan pada bulan Juli hingga Oktober tahun 2025. Proses *reforming* dan pembuatan spesimen uji dilakukan di industri manufaktur kereta api, sementara proses pengujian yang meliputi *tensile test*, *bending test*, dan *hardness*

test dilakukan di Laboratorium Uji Bahan Politeknik Negeri Madiun.

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini disebutkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Bahan

Alat	Bahan
Mesin <i>Band Saw</i>	Aluminium 6061
<i>Brander</i>	Baru Gerinda dan Mata Potong
<i>Thermogun</i> (-32°C - 550°C)	Gas LPG
<i>Laser Cutting</i>	<i>Belt Sander</i> (Grid 240- 600)
<i>Polisher Machine</i>	<i>Polishing Paper</i> (Grid 800 - 5000)
<i>Tensile Tester</i> (300 kN)	<i>Polishing Cloth</i>
<i>Bending Tester</i> (300 kN)	<i>Metal Polish</i>
<i>Vickers Hardness Tester</i>	Cairan Etsa
Mikroskop Digital	Aquades
<i>Marker</i>	Alkohol

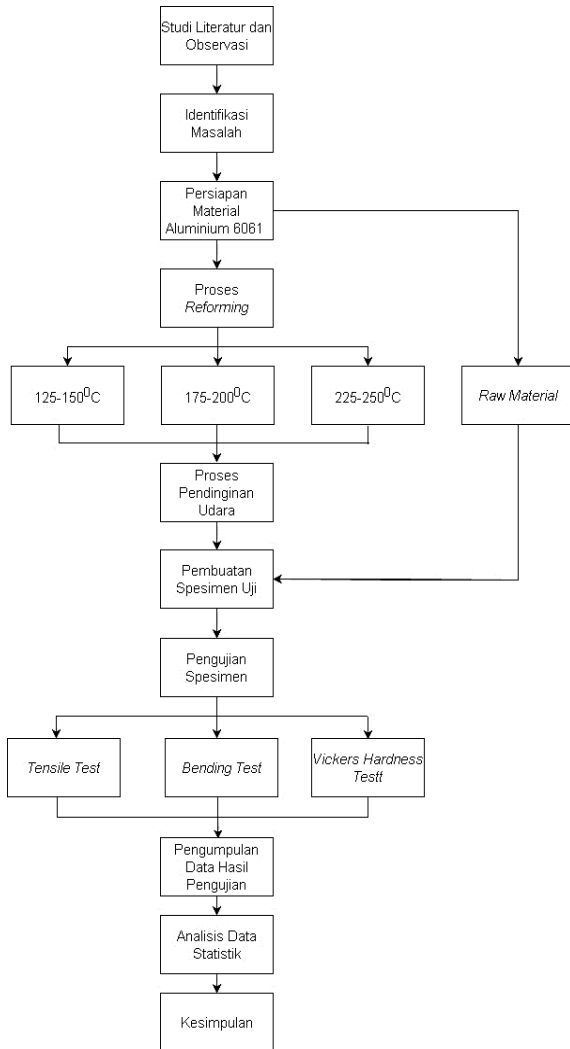
3.3 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen kuantitatif dengan variasi temperatur *reforming* 125–150 °C, 175–200 °C, dan 225–250 °C serta bahan aluminium 6061 dengan ketebalan 8 mm. Penelitian ini menggunakan tiga jenis variabel: variabel bebas (temperatur *reforming*), variabel terikat (hasil dari *tensile test*, *bending test*, dan *vickers hardness test*), dan variabel kontrol (aluminium 6061).

Reforming dilakukan dengan menggunakan *brander* hingga mencapai temperatur yang telah ditentukan. Kemudian dibentuk spesimen uji sesuai standar pengujian yang digunakan. Pada setiap variasi temperatur *reforming*, disiapkan tiga spesimen uji untuk masing-masing *tensile test* dan *bending test* sebagai pengulangan (*replicates*) guna memastikan validitas data. Sementara itu, pada *vickers hardness test* dilakukan pengukuran sebanyak 13 titik pada setiap spesimen untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif.

Untuk mengevaluasi sifat mekanik, dilakukan *tensile test* dengan menggunakan *tensile tester* (300 kN).

Bending test dilakukan menggunakan *bending tester* (300 kN), masing-masing berpedoman pada standar ASTM E8/E8M dan ASTM E290. Selanjutnya *Vickers hardness test* dikerjakan menggunakan *Vickers Hardness Tester*, yang prosesnya mengacu pada standar ASTM E92.



Gambar 2. Alur Penelitian

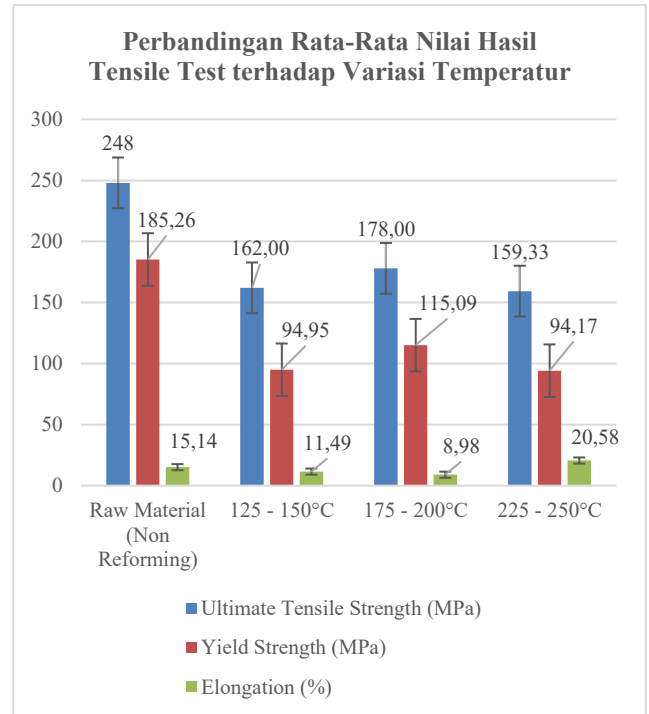
Data hasil pengujian dianalisis menggunakan Analisis Varians (ANOVA) dengan bantuan perangkat lunak IBM SPSS Statistics versi 25 pada tingkat signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$) untuk memastikan akurasi dan validitas hasil pengujian. Proses penelitian ditunjukkan dalam bagan alir pada Gambar 2.

4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini berisi analisis dan pembahasan dari spesimen *raw material* dan spesimen *reforming* terhadap nilai kekuatan tarik (MPa), kekuatan tekuk (MPa), dan nilai kekerasan (HV).

4.1 Tensile Test

Setelah selesai dilakukan pengujian diperoleh data *yield strength*, *ultimate tensile strength*, dan *elongation*.



Gambar 3. Perbandingan rata-rata nilai hasil *tensile test* terhadap variasi temperatur. *Error bar* menunjukkan *standard error* (SE).

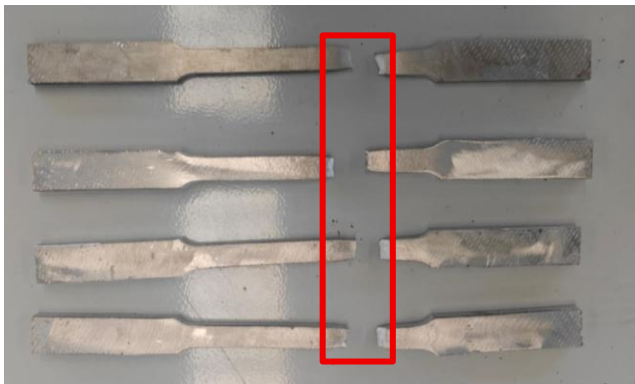
Gambar 3 memperlihatkan nilai *Yield Strength* tertinggi terdapat pada material tanpa perlakuan panas (*raw material*), yaitu 185.26 MPa. Seiring meningkatnya temperatur *reforming*, nilai *yield strength* menurun. Pada temperatur tertinggi (225–250 °C), *yield strength* turun hingga 94.17 MPa. Semakin tinggi temperatur *reforming*, maka kekuatan luluh (*yield strength*) aluminium 6061 cenderung menurun [11]. Hal ini menunjukkan penurunan kemampuan material untuk menahan beban sebelum mengalami deformasi plastis.

Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) yang tertinggi juga pada *raw material*, yaitu 248 MPa. Terjadi penurunan tajam hingga 162 MPa pada rentang temperatur 125–150 °C. Pada temperatur 175–200 °C sempat naik menjadi 178 MPa, lalu menurun kembali menjadi 159.33 MPa pada 225–250 °C. UTS menurun secara umum dengan meningkatnya temperatur *reforming*, meskipun ada sedikit fluktuasi. Hal ini menunjukkan bahwa ketahanan maksimum material

sebelum putus juga berkurang akibat perlakuan panas [25].

Nilai *elongation* (perpanjangan) tertinggi justru terdapat pada temperatur 225–250 °C, yaitu 20.58%. Elongasi terendah terjadi pada 175–200 °C yaitu 8.98%. Nilai *elongation* pada *raw material* adalah 15.14%, lebih tinggi dari sebagian besar kondisi *reforming* di bawah 225 °C. Dengan meningkatnya temperatur *reforming*, kemampuan regangan (*ductility*) aluminium 6061 cenderung meningkat, terutama pada temperatur tinggi [26]. Hal ini mengindikasikan material menjadi lebih lunak dan mampu mengalami deformasi lebih besar sebelum patah.

Perlakuan temperatur *reforming* menurunkan kekuatan mekanik (*yield strength* dan UTS) aluminium 6061. Namun, temperatur tinggi meningkatkan keuletan (*Elongation*), terutama pada rentang 225–250 °C. Semakin tinggi temperatur *reforming*, maka material menjadi lebih ulet tetapi kurang kuat. Spesimen hasil pengujian *tensile test* terlihat pada gambar 4.



Gambar 4. Spesimen hasil *tensile test*

Hasil analisis statistik pada Tabel 2 menunjukkan bahwa variasi temperatur *reforming* berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik Aluminium 6061.

Tabel 2 *Analysis of Varians* (ANOVA)

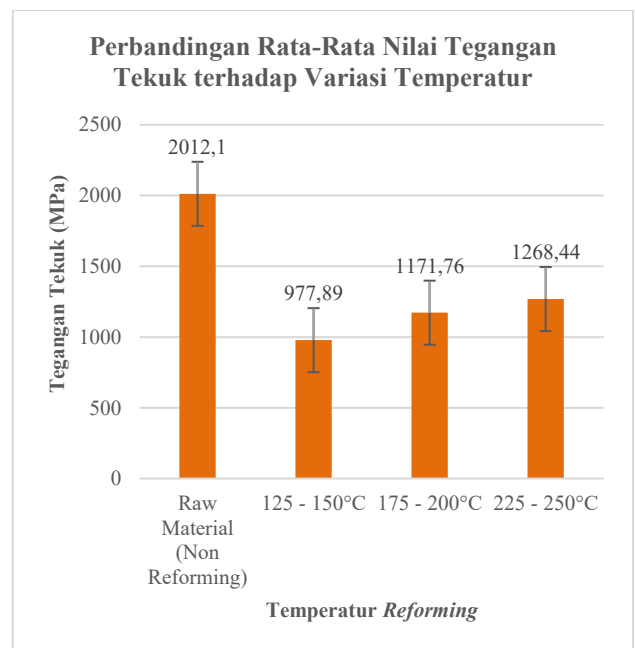
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Yield Strength	Between Groups	16664.064	3	5554.688	95.406	.000
	Within Groups	465.775	8	58.222		
	Total	17129.839	11			
Ultimate Tensile Strength	Between Groups	20177.103	3	6725.701	218.000	.000
	Within Groups	277.667	9	30.852		
	Total	20454.769	12			
Elongation	Between Groups	228.314	3	76.105	10.941	.003
	Within Groups	55.649	8	6.956		
	Total	283.963	11			

Pada parameter *elongation*, diperoleh nilai signifikansi sebesar 0,003 ($< 0,05$), yang menandakan adanya perbedaan bermakna antara sampel *raw material* dan sampel yang mengalami perlakuan temperatur pada rentang 125–150°C, 175–200°C, dan 225–250°C. Nilai signifikansi untuk *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dan *Yield Strength* (YS) masing-masing sebesar 0,000 ($< 0,05$), yang menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan antar kelompok perlakuan. Dengan demikian, disimpulkan bahwa variasi temperatur *reforming* memberikan pengaruh nyata terhadap perilaku mekanik aluminium 6061, baik dalam hal kekuatan maupun keuletannya. Hasil ini menguatkan bahwa perlakuan termal pada proses *reforming* berperan penting dalam menentukan karakteristik mekanik material, terutama dalam aplikasi struktural seperti *sidewall* kereta.

4.2 Bending Test

Berdasarkan Gambar 5, nilai tekuk pada aluminium 6061 menunjukkan bahwa perlakuan panas (*reforming*) memengaruhi tegangan tekuk material.

Sampel tanpa perlakuan panas memiliki tegangan tekuk tertinggi, yaitu 2012,1 MPa. Setelah diberi perlakuan panas pada temperatur 125–150 °C, kekuatan tekuk turun drastis menjadi 977,89 MPa. Namun, saat temperatur dinaikkan ke 175–250 °C, nilai tegangan tekuk kembali meningkat, meskipun belum sekuat material awal.



Gambar 5. Perbandingan rata-rata nilai tegangan tekuk terhadap variasi temperatur *reforming*. *Error bar* menunjukkan *standard error* (SE).

Peningkatan temperatur *reforming* pada aluminium 6061 cenderung menurunkan tegangan tekuk secara umum, terutama pada temperatur rendah, namun pemanasan pada temperatur lebih tinggi mampu memperbaiki sebagian kekuatan tekuk yang sempat menurun [11].

Tabel 3 ANOVA Data *Bending Test*

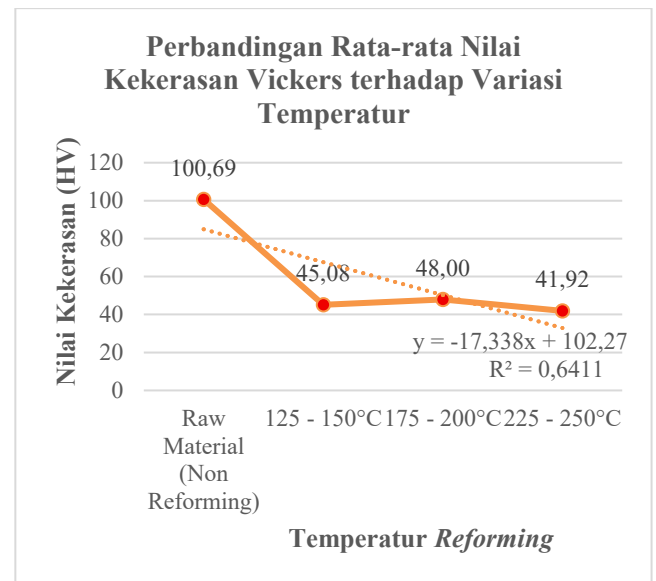
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Tegangan Tekuk	Between Groups	214,776	3	71,592	10,804	.003
	Within Groups	53,009	8	6,626		
	Total	267,786	11			

Berdasarkan hasil ANOVA yang disajikan dalam Tabel 3, temperatur *reforming* yang bervariasi secara signifikan memengaruhi nilai tegangan tekuk. Dengan nilai signifikansi (Sig.) sebesar 0,003, yang mana lebih kecil dari tingkat signifikansi yang umum digunakan ($\alpha = 0,05$), maka terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik pada rata-rata nilai tegangan tekuk di antara kelompok-kelompok variasi temperatur yang diuji.

4.3 Vickers Hardness Test

Berdasarkan data hasil *vickers hardness test*, menunjukkan bahwa peningkatan temperatur *reforming* menghasilkan penurunan nilai kekerasan. Rentang temperatur 175 – 200°C menghasilkan peningkatan nilai kekerasan maksimum dengan nilai rata-rata 48 (HV). Penurunan nilai kekerasan terjadi pada temperature 225 – 250°C karena memasuki kondisi *over aging*. Hal ini disebabkan oleh perlakuan panas yang diberikan mengakibatkan material menjadi lunak [27].

Nilai $R^2 = 0.6411$ pada Gambar 6, berarti sekitar 64,11% variasi nilai kekerasan dijelaskan oleh perubahan temperatur *reforming*. Sisanya 35,89% dipengaruhi oleh faktor lain di luar variasi temperatur *reforming*.



Gambar 6. Perbandingan rata-rata nilai kekerasan *vickers* terhadap variasi temperatur.

Dari persamaan regresi linear dan nilai R^2 pada gambar 6 disimpulkan bahwa terdapat hubungan negatif antara temperatur *reforming* dan kekerasan material: semakin tinggi temperatur, semakin rendah nilai kekerasan. Hubungan ini cukup kuat ($R^2 = 0.64$) meskipun tidak sempurna, artinya temperatur merupakan faktor dominan namun bukan satu-satunya penyebab perubahan kekerasan.

Dari hasil *vickers hardness test* menunjukkan bahwa penurunan nilai kekerasan terjadi pada spesimen dengan proses *reforming* dibandingkan dengan *raw material*. Semakin tinggi temperatur *reforming* yang digunakan menghasilkan nilai kekerasan yang semakin rendah, hal ini berpengaruh terhadap sifat mekanik material aluminium 6061 yang semakin lunak dan ulet [28].

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi temperatur *reforming* berpengaruh terhadap karakteristik sifat mekanik dan struktur mikro aluminium 6061 pada *sidewall* kereta. Semakin tinggi temperatur *reforming*, nilai *yield strength*, *ultimate tensile strength*, tegangan tekuk, dan kekerasan mengalami penurunan dibandingkan *raw material*, sedangkan nilai *elongation* cenderung meningkat sehingga material menjadi lebih ulet. Dengan demikian, rentang temperatur 175 – 200 °C memberikan hasil paling

sesuai sebagai rekomendasi temperatur *reforming* pada *sidewall* kereta.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada *Workshop* Manufaktur, Laboratorium Bahan, Program Studi Sarjana Terapan Perkeretaapian, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun yang telah memfasilitasi seluruh kegiatan penelitian.

REFERENSI

- [1] A. Purba, *Buku Monograf; Kereta Cepat Evolusi dan Perkembangan Terkini. In: Kereta Cepat Evolusi dan Perkembangan Terkini*. Bandar Lampung: Graha Ilmu-Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Lampung, 2018.
- [2] H. Hidayat, "Optimasi Parameter Proses Anodisasi Aluminium 6061 untuk Komponen Otomotif," *J. Penelit. Enj.*, vol. 25, hlm. 85–91, 2022.
- [3] N. Hutasoit, M. A. Javed, R. A. R. Rashid, S. Wade, dan S. Palanisamy, "Effects of build orientation and heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of Al6061 aluminium parts built by cold spray additive manufacturing process," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 204, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106526>.
- [4] B. Zamzami, U. Budiarto, dan S. Jokosiswono, "Pengaruh variasi temperatur PWHT terhadap kekuatan tarik, impak, dan struktur mikro aluminium 6061 pasca pengelasan MIG," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 11, hlm. 13–21, 2023.
- [5] P. D. Sanjaya, "Dokumen Observasi. Pengaplikasian Aluminium 6061 pada Sidewall Prototype KCMP," 2025.
- [6] K. Carpenter dan A. Tabei, "On Residual Stress Development, Prevention, and Compensation in Metal Additive Manufacturing," *Materials*, vol. 13, no. 2, hlm. 255, Jan 2020, doi: 10.3390/ma13020255.
- [7] D. Xie *dkk.*, "Towards a comprehensive understanding of distortion in additive manufacturing based on assumption of constraining force," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 16, no. sup1, hlm. S85–S97, Sep 2021, doi: 10.1080/17452759.2021.1881873.
- [8] Novianto, I. Setiawan, dan A. Pramono, "Pengaruh Temperatur PWHT Terhadap Struktur Mikro, Uji Kekerasan Dan Uji Tarik Pada Proses Pengelasan Gas Metal Arc Welding (GMAW) Aluminium 5083," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 13, no. 2, hlm. 50–55, 2020.
- [9] S. Yulianto, "Analisa Pengaruh Hardening terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja S45C," *Jurnal Ismetek*, vol. 14, no. 1, hlm. 112–115, 2022.
- [10] M. R. Arimurti *dkk.*, "Analysis of Mechanical Properties and Microstructural Characteristics of Aluminum 6061 under Reforming Temperature Variations in the KCMP Sidewall Prototype," vol. 10, no. 4, 2025.
- [11] Y. I. Chrissanda *dkk.*, "Pengaruh temperatur reforming terhadap sifat mekanik dan metalografi material aluminium 6061 pada sidewall kereta," *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)*, vol. 9, hlm. 30–36, 2025.
- [12] Z. Zulhanif dan Z. Hasymi, "Pengaruh Variasi Temperatur Artificial Aging Pada Aluminium 6061 Terhadap Sifat Kekerasan Dan Struktur Mikro," *MECH_JTM*, vol. 14, no. 2, hlm. 184, 2023.
- [13] R. Ardiansyah, "Pengaruh Variasi Welding Pressure pada Proses Resistance Spot Welding terhadap Kualitas Sambungan untuk Sidewall Kereta Api KRL KCI di PT Industri Kereta Api (Persero)," Tugas Akhir, Politeknik Negeri Jakarta, 2024.
- [14] W. D. Callister dan D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, 10 ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2018.
- [15] ASTM B209/B209M, *Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate*. Unites States: ASTM International, 2021.
- [16] M. Opprecht, J.-P. Garandet, G. Roux, C. Flament, dan M. Soulier, "A solution to the hot cracking problem for aluminium alloys manufactured by laser beam melting," *Acta Materialia*, vol. 197, hlm. 40–53, Sep 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.07.015>.
- [17] M. Z. Mahbub dan H. Oktadinata, "Pengaruh Masukan Panas terhadap Distorsi dan Sifat Mekanik pada Pengelasan Dissimilar Baja AISI 304 dan Baja SS400 Menggunakan Metode GTAW," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 11, no. 1, 2023.
- [18] S. Y. Kristanta, A. Setyani, S. Sudaryanto, M. Syukron, dan M. Santoso, "A Review of Reforming Processes in the Railway Manufacturing Industry: Case Study of PT. Industri Kereta Api (Persero)," *j. of metallurgical. eng. and. process. technol.*, vol. 5, no. 1, hlm. 114, Agu 2024, doi: 10.31315/jmept.v5i1.12772.
- [19] I. Guzmán-Flores *dkk.*, "Enhancing the Mechanical Properties of a 6061 Aluminum

- Alloy by Heat Treatment from the Perspective of Taguchi Design-of-Experiments,” *Applied Sciences*, vol. 14, no. 13, hlm. 5407, Jun 2024, doi: 10.3390/app14135407.
- [20] W. Guan *dkk.*, “Influence of artificial aging time on bending characteristics of 6061 aluminum sheet,” *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 51, no. 11, hlm. 1533–1542, Nov 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/mawe.202000100>.
- [21] Q. Li, X. Bao, C. Fan, X. Zhang, dan Y. Lan, “The Influence of Multi-Phase Intermetallic Compounds on the Microstructure and Tribological Behaviors of 6061 Al Alloy by Adding AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy,” *International Journal of Metalcasting*, vol. 16, hlm. 871–877, Jul 2022.
- [22] ASTM E8/E8M, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, 2022.
- [23] ASTM E290, *Standard Test Method for Bend Testing of Material for Ductility*, 2022.
- [24] ASTM E92, *Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*.
- [25] Z. Jia, Z. Luo, G. Hu, dan H. Zhang, “Impact of heat treatment parameters on the plastic properties of 6061 aluminum alloy,” *Materials*, vol. 18, 2025.
- [26] M. Shekarzadeh dan E. Hosseini, “Investigation of Single-stage and Two-stage Forming Limit Curve of Aluminum 6061 with Different Temperatures and Strain Rates,” *Int. J. Automot. Mech. Eng.*, vol. 19, no. 2, hlm. 9859–9871, Agu 2022, doi: 10.15282/ijame.19.2.2022.18.0760.
- [27] A. Ahmad, N. Afzal, dan M. Rafique, “Structural And Mechanical Response of Artificially Aged Aluminum Alloy 6061,” *Strength of Materials*, vol. 53, hlm. 502–510, Okt 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-021-00311-0>.
- [28] J. Sidik, M. Sholihin, dan R. Arthur, “Pengaruh variasi temperatur perlakuan panas aging terhadap sifat mekanik aluminium AA 6061,” *TRAKSI: Majalah Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 19, no. 1, 2019.