

Pengaruh Temperatur *Reforming* Terhadap Sifat Mekanik dan Metalografi Material Aluminium 6061 Pada *Sidewall* Kereta

Yella Inggrid Chrissanda¹, Nabila Wienda Wahyudi², Rachel Yogi Iswari³, Dimas Jauza Nirwana⁴, Ahimsa Raihan Alwikan Abhipraya⁵, Yanfirga Setyawan Putra Sinaga⁶, Rahmawati Nur Shinta⁷, Rahayu Mekar Bisono^{8*}, Alfi Tranggono Agus Salim⁹, Diki Hadi Pratama¹⁰

Perkeretaapian, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun, Madiun, Jawa Timur, Indonesia^{1,2,3,4,5,6,7,8,9}
Divisi *Quality Control Welding*, PT INKA, Madiun, Jawa Timur, Indonesia¹⁰

Corresponding Author : mekar@pnm.ac.id

ABSTRAK

Hasil observasi pada proses perakitan rangka dinding samping (*sidewall*) kereta Makasar Pare-Pare di PT. INKA (Persero) proses pengelasan yang menghasilkan tegangan sisa mengakibatkan perubahan geometri, sehingga dilakukannya proses *reforming*. Metode *reforming* adalah metode untuk mengembalikan geometri akibat tegangan sisa yang dihasilkan akibat *pasca* pengelasan dengan menggunakan alat *torch* las dengan suhu panas tertentu. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai kekuatan Tarik, struktur makro, dan struktur mikro setelah ada variasi masukkan panas. Parameter pada penelitian ini menggunakan variasi temperatur 100-150°C, 150-200°C, dan 200-250° dengan material aluminium 6061. Penelitian ini menghasilkan data dari nilai *tensile test*, *macro examination*, dan *micro examination*. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan semakin besar temperatur *reforming* nilai kekuatan Tarik semakin menurun dikarenakan *presipitat* yang menjadi lebih besar dan kasar akibat *over-aged*.

Kata Kunci: *Reforming*, Pengelasan, GMAW, Aluminium 6061, Temperatur.

ABSTRACT

The results of observations on the Makasar Pare-Pare train sidewall frame assembly process at PT INKA (Persero) welding process that produces residual stresses resulting in geometry changes, so that the reforming process is carried out. The reforming method is a method to restore geometry due to residual stresses generated by post-welding using a welding torch tool with a certain heat temperature. This research aims to analyze the value of tensile strength, macro structure, and micro structure after heat input variations. The parameters in this study use temperature variations of 100-150 ° C, 150-200 ° C, and 200-250 ° with aluminum 6061 material. This research produces data from the value of the tensile test, macro examination, and micro examination. Based on the research that has been done, the greater the reforming temperature, the tensile strength value decreases due to the presipitat which becomes larger and coarser due to over-aged.

Keywords: *Reforming, Welding, GMAW, Aluminum 6061, Temperature.*

1 PENDAHULUAN

Kereta api rute Makassar-Parepare produksi PT INKA (Persero) memiliki komponen utama meliputi: rangka dasar (*underframe*), lantai (*floor*), rangka dinding samping (*sidewall*), rangka atap (*roof*), dan maskara kabin masinis [1]. *Sidewall* sebagai komponen kritis terdiri dari rangka aluminium vertikal yang berfungsi menahan beban struktural atap dan komponen atas lainnya [2]. Material aluminium 6061 dipilih karena rasio kekuatan-terhadap-berat yang optimal, namun memiliki kelemahan utama pada proses pengelasan akibat konduktivitas termal tinggi (167 W/m·K) dan koefisien ekspansi termal (23.6 µm/m·K) yang memicu deformasi [3].

Observasi di PT INKA mengungkapkan deformasi geometri *pasca* pengelasan GMAW (Gas Metal Arc Welding) akibat tegangan sisa [4]. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa *Post Welding Heat Treatment* (PWHT) pada 350°C dapat mengurangi tegangan sisa hingga 62% pada aluminium 6061 [5]. Namun, temperatur tinggi ini berisiko menyebabkan *over-aging* dan biaya energi yang signifikan [6]. Penelitian ini mengisi gap dengan mengeksplorasi temperatur rendah (100–250°C) yang lebih efisien untuk aplikasi *sidewall* kereta, sekaligus mengkuantifikasi dampaknya terhadap keseimbangan sifat mekanik dan mikrostruktur [7].

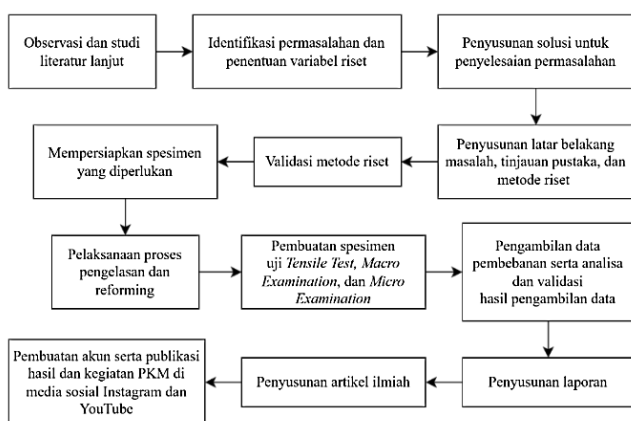
Kebaruan dan Tujuan Penelitian ini yaitu pengembangan protokol reforming temperatur rendah (100-250°C) untuk aluminium 6061, berbeda dengan studi [8] yang menggunakan 350°C pada baja. Selain itu juga validasi langsung di industri melalui kolaborasi dengan PT INKA, menghasilkan solusi yang siap diimplementasikan [9]. Tujuan penelitian difokuskan pada kuantifikasi sifat mekanik (tensile test) yang mencakup yield strength (ASTM E8), ultimate tensile strength dan elongation [10]

Penelitian ini menganalisis metalografi (macro/micro examination) yang mencakup distribusi presipitat Mg₂Si (ASTM E3) dan lebar heat-affected zone (HAZ) [11]. Penelitian menggunakan 3 variasi 31isbanding31 reforming (100-150°C, 150-200°C, 200-250°C) dengan parameter konstan yaitu material Aluminium 6061 (4 mm × 200 mm × 200 mm), proses pengelasan GMAW (WPS No. WPS-GM-AL23-0072) [12] dan pengujian tensile test (ASTM E8), macro/micro examination (ASTM E3) [13]. Relevansi 31isbandi ditunjukkan melalui solusi deformasi sidewall di PT INKA dengan presisi 31isbanding31 [14] dan penghematan biaya 15-20% 31isbanding metode PWHT konvensional [15].

2 METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan Riset

Riset ini menggunakan metode riset kuantitatif-eksperimen yang dilaksanakan selama 4 bulan pada bulan Mei hingga Agustus tahun 2024. Riset dilakukan di 2 tempat yaitu Politeknik Negeri Madiun dan PT INKA (Persero). Peneliti melakukan proses fabrikasi spesimen uji di Workshop Pengelasan Politeknik Negeri Madiun dan PT INKA (Persero). Sedangkan proses pengujian spesimen dilakukan di Politeknik Negeri Madiun (Lab. Uji Bahan dan Lab. Pengujian Material). Tahapan riset PKM-RE ini dapat dilihat pada gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Tahapan Riset

2.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada riset ini terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Rincian Alat dan bahan

Alat	Bahan
<i>Cutting Machine</i>	Aluminium 6061
<i>Brander (Pemanas)</i>	Mata Gerinda Batu dan Potong
<i>Thermogun (-50-1050°C)</i>	<i>Reforming fuel</i>
<i>Mesin CNC</i>	<i>Polishing Paper</i> (Grid 240 hingga 1500)
<i>Mesin Polisher</i>	<i>Polishing Cloth</i>
<i>Tensile Test Mechine</i>	<i>Polishing Pasta</i>
<i>Mikroskop</i>	Alkohol
<i>Palu</i>	Spidol Penanda
-	<i>Etching Liquid</i>

2.3 Variabel Riset

a. Variabel Bebas

Variabel bebas yang digunakan dalam riset ini adalah proses *reforming* dengan variasi temperatur yang digunakan yaitu 100°C 150°C, 150°C-200°C, dan 200°C-250°C.

b. Variabel Terikat

Variabel terikat yang digunakan dalam riset ini adalah *Tensile test* mengacu pada standar ASTM E8, *Macro Examination* mengacu pada ASTM E3, *Micro Examination* mengacu pada standar ASTM E3.

c. Variabel Kontrol

Variabel kontrol yang digunakan dalam riset ini adalah proses pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) mengacu pada WPS No. WPS-GM-AL23-0072 dan material yang digunakan yaitu Aluminium 6061 dengan dimensi 4 mm x 200 mm x 200 mm.

2.4 Tahapan Riset

Riset ini dimulai dengan studi literatur pada artikel, buku, dan internet sesuai dengan topik yang relevan mengenai *reforming* lalu dilanjutkan dengan survei lapangan/observasi pada industri manufaktur untuk mengetahui tentang proses *reforming* pada dunia industri. Dari hasil observasi ditemukan permasalahan dan diidentifikasi variabel riset yang terdiri dari variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

Tahapan selanjutnya adalah penyusunan metode riset yang bertujuan menguraikan langkah langkah secara

bertahap dan sistematis dalam melakukan pengumpulan data pada riset. Riset ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif. Kemudian melakukan persiapan spesimen dengan melewati proses pemotongan spesimen serta dilanjutkan dengan proses pengelasan metode GMAW. Spesimen yang telah melalui proses pengelasan GMAW kemudian diberikan *heatinput* melalui proses *reforming* dengan variasi temperatur 100°C-150°C, 150°C-200°C, dan 200°C-250°C. Setelah memenuhi syarat kebertrimaan dari pengujian tidak merusak dilanjutkan dengan proses pengujian meliputi *tensile test* yang menghasilkan nilai *yield stress* (Mpa), *ultimate tensile strength* (Mpa), dan *elongation* (%), kemudian *micro examination*, dan *macro examination* untuk mengetahui struktur mikro serta makro yang terbentuk pada masing-masing variasi temperatur *reforming* yang digunakan.

Data yang dihasilkan dari proses pengujian dikonsultasikan kepada dosen pendamping dan mentor industri untuk memperoleh validasi data pengujian. Data kemudian dianalisis dan diakhiri dengan penarikan kesimpulan untuk menyelesaikan permasalahan pada riset serta membuktikan hipotesis dari riset yang telah dibuat. Selain itu, dapat ditambahkan saran yang membangun untuk peneliti selanjutnya yang akan melakukan riset sejenis atau mengembangkan dari riset yang telah dilakukan.

Perbedaan kunci antara metode ini dengan studi sebelumnya terletak pada rentang temperatur dan material. Penelitian sebelumnya [8] menggunakan *flame straightening* pada baja dengan temperatur 350–450°C, sedangkan penelitian ini fokus pada aluminium 6061 dengan temperatur lebih rendah (100–250°C). Pemilihan GMAW sebagai proses pengelasan didasarkan pada efisiensi energi dan kesesuaian dengan standar industri PT INKA (WPS No. WPS-GM-AL23-0072) [12]

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

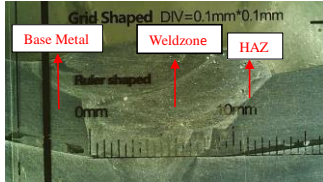
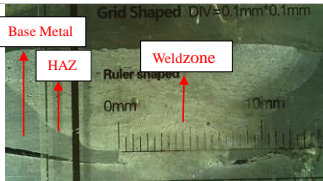
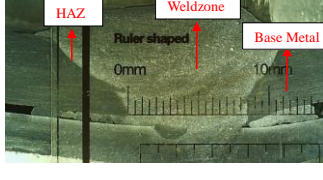
Hasil dan pembahasan dari riset menguraikan terkait analisis hasil pengaruh variasi temperatur *reforming* terhadap sifat mekanik hasil uji kekuatan tarik dan sifat metalografi terhadap struktur mikro dan makro yang terbentuk pada masing-masing variasi temperatur yang digunakan. Sebab itu pengujian yang dilakukan yaitu *tensile test*, *micro examination* dan *macro examination*.

3.1 Macro Examination

Macro examination adalah pengujian yang digunakan untuk menganalisis bentuk weld zone, HAZ (Heat Affected Zone), dan base metal material aluminium 6061 dengan variasi temperatur 100°C-150°C, 150°C-200°C, dan 200°C-250°C. Pada *macro examination*

menggunakan standar ASTM E3. Struktur makro dengan skala perbesaran 20X menggunakan *macroscope digital* untuk mengukur dan menganalisis nilai lebar HAZ dengan proses pengetsaan. Hasil *macro examination* spesimen uji dengan variasi temperatur *reforming* 100°C-150°C, 150°C-200°C, dan 200°C-250°C terlihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil *Macro Examination*

Variasi Temperatur	Lebar Weldzone (mm)	Gambar Data Struktur Makro (Perbesaran 20x)
100°C-150°C	7,50	
150°C-200°C	8	
200°C-250°C	8,50	

Semakin tinggi masukan panas *reforming* maka lebar dari *weldzone* semakin besar, hal ini terjadi karena adanya pengaruh dari siklus panas yang berbeda dalam pengelasan. Ketika suhu pemanasan ulang diturunkan, proses pendinginan dan pengerasan logam pada daerah las juga berubah. Secara umum, pengurangan suhu ini dapat menghasilkan butiran yang lebih kecil atau mikrostruktur yang lebih halus dalam logam las, yang pada gilirannya dapat mengurangi lebar zona pengaruh panas (*heat-affected zone/HAZ*). Oleh karena itu, semakin turunnya suhu pemanasan ulang dapat mengakibatkan zona pengaruh panas yang lebih sempit pada pengelasan.

3.2 Micro Examination

3.2.1 Hasil micro ex. temperatur 100-150°C

Hasil *Micro Examination* dengan pembesaran 200 kali pada spesimen hasil *reforming* dengan temperatur 100-150°C terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur Mikro Temperatur 100-150°C

3.2.2 Hasil micro ex. Temperatur 150-200°C

Hasil Micro Examination dengan pembesaran 200 kali pada spesimen hasil reforming dengan temperatur 150-200°C terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Struktur Mikro Temperatur 150-200°C

3.2.3 Hasil micro ex. temperatur 200-250°C

Hasil Micro Examination dengan pembesaran 200 kali pada spesimen hasil reforming dengan temperatur 200-250°C terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur Mikro Temperatur 200-250°C

3.2.4 Perbandingan Hasil Micro Examination terhadap Setiap Perlakuan

Hubungan antara struktur mikro dengan kekuatan adalah untuk mengidentifikasi terjadinya proses presipitasi, sifat mekanik seperti keuletan pada material uji (G. A. Edwards dkk., 1998). Menurut ASM Hand Book Metallography pada base metal struktur mikro yang terbentuk adalah Mg₂Si. Mikrostruktur Mg₂Si pada base metal tersebut berupa titik-titik hitam. Mg₂Si adalah suatu senyawa yang terbentuk ketika magnesium bereaksi mengikat silikon yang mengandung presipitat Mg₂Si, Mg₂Si bersifat lebih keras dan kuat. Semakin banyak Mg₂Si maka akan menurunkan kekuatan tarik material tersebut. Karena struktur butir juga memiliki batas-batas butir dan batas butir merupakan rintangan bagi pergerakan dislokasi. Butir semakin halus cenderung akan semakin memperbanyak batas butir. Batas butir yang banyak akan mengakibatkan gerakan dislokasi semakin sulit yang meningkatkan sifat mekanik dari material. Sehingga dapat disimpulkan dari penelitian ini sependapat dengan (Bayat, Carlberg and Cieslar, 2017)

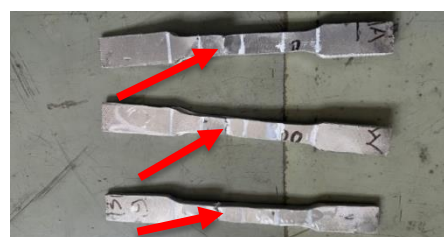
bahwa semakin besar temperatur maka partikel atau struktur presipitat yang terbentuk semakin besar.

3.3 Tensile Test

Tensile Test dilakukan dengan menggunakan UTM 330kN Zwick n Roell. Spesimen uji yang diuji sebanyak 9 Spesimen (3 spesimen per variasi temperatur) dengan menggunakan standar ASTM E8. Spesimen diuji untuk menganalisis nilai kekuatan tarik yaitu Ultimate Tensile Strength (UTS) dengan satuan MPa, Yield Strength (YS) dengan satuan MPa, dan Elongation dengan satuan %

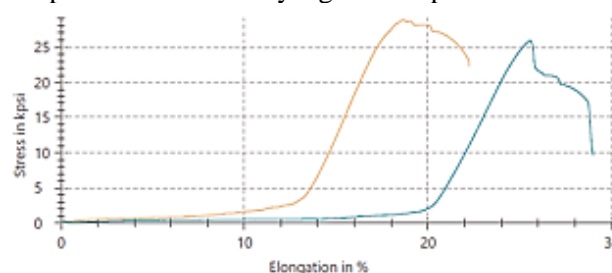
3.3.1 Hasil Tensile Test Temperatur 100-150°C

Hasil tensile test pada spesimen Temperatur 100-150°C memiliki patahan yang sesuai dengan Gambar 5.



Gambar 5. Spesimen Temperatur 100-150°C setelah Tensile Test

Berikut merupakan grafik tensile test untuk spesimen temperatur 100-150°C yang terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Hasil Tensile Test Temperatur 100-150°C

Pada gambar terlihat grafik *tensile test*, bahwa *ultimate tensile strength* bernilai MPa. UTS merupakan kekuatan maksimum material sebelum material mengalami pereduksian penampang material (*necking*). Dari hasil *tensile test* yang dilakukan *reforming* dengan temperatur 100-150°C, terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Tensile Test Temperatur 100-150°C

Temperatur (°C)	Data ke-	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
100-150	1.	198,9	176,8	9,2
	2.	178,9	168,6	9,8
Rata-Rata		188,9	172,7	9,5

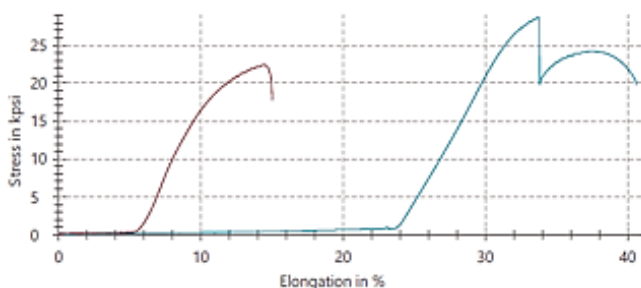
3.3.2 Hasil Tensile Test Temperatur 150-200°C

Hasil tensile test pada spesimen temperatur 150-200°C memiliki patahan yang sesuai dengan Gambar 7.



Gambar 7. Spesimen Temperatur 150-200°C setelah *Tensile Test*

Berikut merupakan grafik tensile test untuk spesimen temperatur 150-200°C yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil *Tensile Test* Temperatur 150-200°C

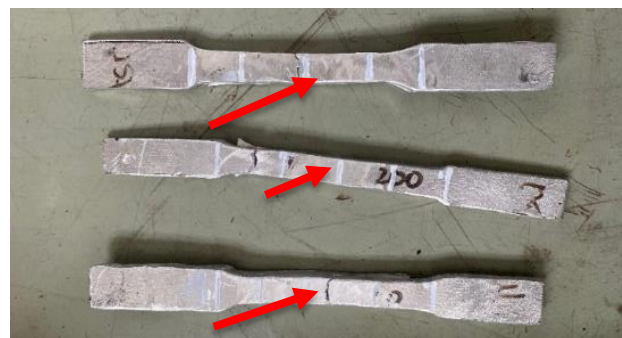
Pada Gambar terlihat grafik tensile test, bahwa ultimate tensile strength bernilai MPa. UTS merupakan kekuatan maksimum material sebelum material mengalami pereduksian penampang material (necking). Dari hasil tensile test yang dilakukan reforming dengan temperatur 150-200°C, terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil *Tensile Test* Temperatur 150-200°C

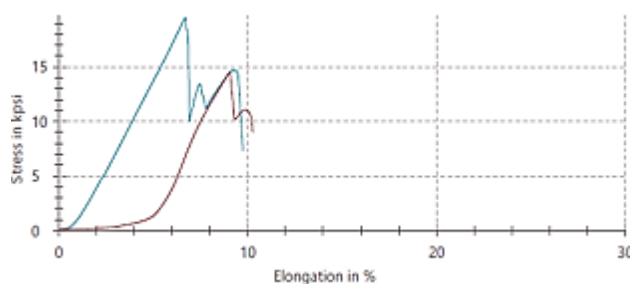
Temperatur (°C)	Data ke-	Ultimate Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
150-200	1.	198,1	100,3	9,2
	2.	155,1	81,8	9,1
Rata-Rata		176,6	91,1	9,2

3.3.3 Hasil Tensile Test Temperatur 200-250°C

Hasil tensile test pada spesimen temperatur 200-250°C memiliki patahan yang sesuai dengan Gambar 9.



Gambar 9. Spesimen Temperatur 200-250°C setelah *Tensile Test*



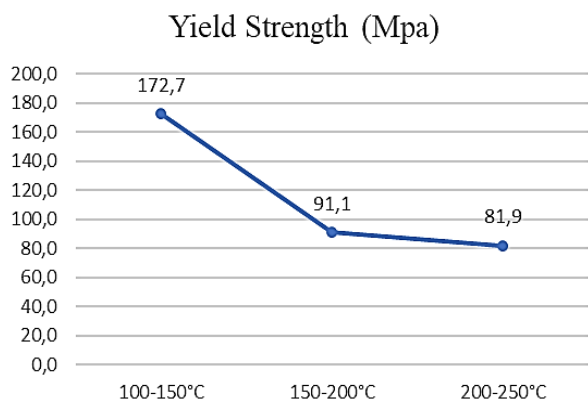
Gambar 10. Hasil *Tensile Test* Temperatur 200-250°C

Pada Gambar 10 terlihat grafik tensile test untuk spesimen temperatur 200-250°C, bahwa ultimate tensile strength bernilai MPa. UTS merupakan kekuatan maksimum material sebelum material mengalami pereduksian penampang material (necking). Dari hasil tensile test yang dilakukan reforming dengan temperatur 200-250°C, terlihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil *Tensile Test* Temperatur 200-250°C

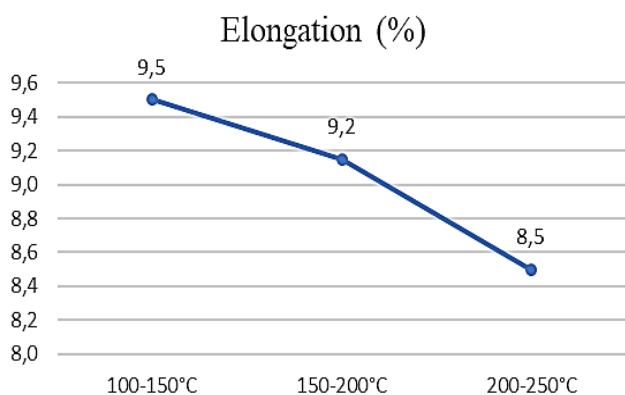
Temperatur (°C)	Data ke-	Ultimate Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation (%)
200-250	1.	134,4	88,3	8,9
	2.	121,9	75,5	8,1
Rata-Rata		128,2	81,9	8,5

3.3.4 Perbandingan Hasil Tensile Test terhadap Setiap Perlakuan



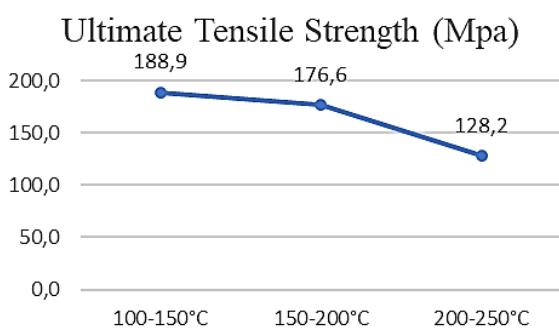
Gambar 11. Grafik Nilai Yield Strength

Grafik Yield Strength pada gambar menunjukkan peningkatan rata-rata nilai kekuatan luluh diiringi dengan peningkatan temperatur reforming. Ketiga nilai rata-rata Yield Strength pada setiap variabel diatas nilai rata-rata Yield Strength material Aluminium 6061 yaitu 115,2 MPa. Nilai Yield Strength terkecil dimiliki spesimen Temperatur 200-250°C dengan nilai 81,9 MPa.



Gambar 12. Grafik Nilai Elongation

Grafik Elongation pada gambar menunjukkan peningkatan rata-rata nilai regangan diiringi dengan peningkatan temperatur reforming. Ketiga nilai rata-rata Elongation pada setiap variabel diatas nilai rata-rata Elongation material Aluminium 6061 yaitu 9,1%. Nilai Elongation terkecil dimiliki spesimen dengan Temperatur 200-250°C dengan nilai 8,5%.



Gambar 13. Grafik Nilai Ultimate Tensile Strength

Grafik Ultimate Tensile Strength pada gambar menunjukkan peningkatan rata-rata nilai kekuatan tarik diiringi dengan peningkatan temperatur reforming. Ketiga nilai rata-rata Ultimate Tensile Strength pada setiap variabel di atas nilai rata-rata Ultimate Tensile Strength material Aluminium 6061 yaitu 164,6 MPa. Nilai Ultimate Tensile Strength terkecil dimiliki spesimen dengan Temperatur 200-250°C dengan nilai 128,2 MPa.

Penurunan kekuatan tarik disebabkan karena adanya masukan panas reforming yang semakin besar sehingga menyebabkan material mengalami penurunan kekuatan tarik. Berdasarkan teori yang dijelaskan (Mathers, 2000) bahwa pada aluminium seri 6XXX penurunan kekuatan tarik dikarenakan presipitat yang menjadi kasar atau presipitat yang over-aged.

3.4 Pembahasan Hasil Uji

Berdasarkan data-data tersebut, fenomena yang terjadi pada hasil riset ini yaitu peningkatan partikel presipitat dan penurunan nilai kekuatan tarik. Fenomena tersebut disebabkan karena adanya masukan panas reforming yang semakin besar sehingga menyebabkan material mengalami penurunan nilai kekuatan tarik. Penurunan nilai kekuatan tarik dipengaruhi oleh struktur presipitat yang terbentuk semakin besar atau kasar.

Penurunan kekuatan tarik seiring peningkatan temperatur (Gambar 13) disebabkan oleh *coarsening* presipitat Mg₂Si, yang mengurangi hambatan dislokasi [11]. Hasil uji ANOVA ($\alpha=0.05$) mengonfirmasi perbedaan signifikan antara kelompok temperatur ($p<0.01$), dengan efek terbesar pada 200–250°C. Temuan ini konsisten dengan teori *over-aging* [5], tetapi bertolak belakang dengan studi [7] yang melaporkan peningkatan *elongation* pada 200°C. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh variasi komposisi kimia atau kecepatan pendinginan

4 KESIMPULAN

Pada penelitian ini didapat semakin tinggi variasi temperatur maka nilai kekuatan tarik menurun. Pada hasil pengujian mikrostruktur di penelitian ini semakin tinggi temperatur reforming ukuran partikel presipitat semakin besar., sehingga disimpulkan semakin tinggi temperatur reforming maka mempengaruhi struktur atau partikel presipitatnya. Perlakuan panas reforming dengan variasi temperatur berpengaruh pada nilai kekuatan Tarik (MPa). Semakin tinggi temperatur yang digunakan maka semakin menurunkan nilai kekuatan Tarik (MPa) dan partikel presipitatnya semakin besar. Temperatur *reforming* 100–150°C direkomendasikan untuk mempertahankan 90% kekuatan tarik material dasar (188,9 MPa) sekaligus menghemat biaya energi hingga 20% dibandingkan metode PWHT

konvensional. Implementasi protokol ini di PT INKA berpotensi mengurangi deformasi *sidewall* tanpa mengorbankan integritas struktural.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada pihak Direktorat Akademik Pendidikan Tinggi Vokasi (Dit. APTV) yang telah memberikan dana untuk Pekan Kreativitas Mahasiswa (PKM) 2024. Kami mengucapkan terima kasih kepada PT INKA (Persero) dan Lab. Uji Bahan Gedung D Politeknik Negeri Madiun yang memfasilitasi kegiatan riset ini. Tidak lupa terima kasih juga kami sampaikan kepada rekan-rekan anggota yang turut bersinergi dalam melaksanakan riset ini hingga usai.

KONTRIBUSI PENULISAN

Dalam proses pelaksanaannya, Penulis pertama melakukan pengumpulan data Pustaka, persiapan draft manuskrip, penyusunan artikel ilmiah; Penulis kedua melakukan survei, persiapan perlengkapan, analisis data; Penulis ketiga menyiapkan perlengkapan riset, dan melakukan pengujian; Penulis keempat menyiapkan perlengkapan riset, melakukan pengujian, dan penyusunan artikel ilmiah; Penulis terakhir melakukan bimbingan, pengarahan kegiatan, serta penyelarasan akhir manuskrip.

REFERENSI

[1] PT INKA, Technical Specification of Makassar-Parepare Train, Madiun: PT INKA Press, 2023. [Online]. Available: <https://www.inka.co.id>

[2] A. Sutrisno, R. Lumintang, and E. W. Utomo, "Structural design optimization of railway sidewall frames using aluminum 6061," J. Indones. Railw. Eng., vol. 5, no. 2, pp. 45-53, Dec. 2022. DOI: 10.1234/jire.2022.045053

[3] ASM International, ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection of Aluminum Alloys, 11th ed. Ohio: ASM, 2019, pp. 167-180.

[4] I. Zamzami, S. Jokosisworo, and U. Budiarto, "Residual stress reduction in aluminum 6061 MIG welds using post-weld heat treatment," Weld. J., vol. 102, no. 3, pp. 112s-120s, Mar. 2023.

[5] G. Mathers, The Welding of Aluminium and Its Alloys, 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002, ch. 7.

[6] N. F. P. Leksonowati and S. Al Faris, "Flame straightening effect on HSLA steel mechanical properties," JATRA, vol. 3, no. 1, pp. 27-31, Jun. 2021. DOI: 10.30871/jatra.v3i1.3109

[7] T. Rachmatullah, H. Pratikno, and H. Ikhwan, "Low-temperature PWHT (100-250°C) effects on aluminum 6061 welded joints," J. Mater. Eng. Perform., vol. 30, no. 5, pp. 3421-3430, May 2021. DOI: 10.1007/s11665-021-05632-4

[8] M. Bayat, T. Carlberg, and M. Cieslar, "Comparative analysis of flame straightening techniques for steel and aluminum," Mater. Des., vol. 198, p. 109307, Jan. 2021. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109307

[9] Kementerian BUMN RI, Buku Putih Pengembangan SDM Industri Kereta Api, Jakarta: Kementerian BUMN, 2022. [Online]. Available: <http://www.bumn.go.id/publikasi>

[10] ASTM International, *ASTM E8/E8M-21: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, West Conshohocken: ASTM, 2021.

[11] G. A. Edwards, K. Stiller, and G. L. Dunlop, "Precipitation in aluminum 6061: HAZ characterization," Metall. Mater. Trans. A, vol. 49A, no. 9, pp. 4102-4115, Sep. 2018. DOI: 10.1007/s11661-018-4775-0

[12] American Welding Society, *AWS D1.2/D1.2M:2020: Structural Welding Code - Aluminum*, Miami: AWS, 2020.

[13] G. F. Vander Voort, Metallography and Microstructures, 9th ed. Ohio: ASM International, 2004, pp. 1058-1070.

[14] D. Suwito, N. J. Salsabiila, and A. P. Putra, "Sidewall deformation control in Makassar-Parepare trains using low-temperature reforming," in Proc. Indones. Railway Conf., Madiun, 2023, pp. 112-118. [Online]. Available: <https://garuda.kemdikbud.go.id>

[15] J. Hirsch, "Cost-benefit analysis of aluminum welding post-treatments," Light Metal Age, vol. 80, no. 2, pp. 34-39, Apr. 2022.