



Pengaruh Variasi Arus Listrik terhadap Struktur Kristal dan Sifat Mekanik pada Baja Karbon M400

Mochammad Sugiri, basugi wisnu
Institut Teknologi Budi Utomo, Indonesia

Diterima: 23 Maret 2024

Disetujui: 16 Mei 2024

Diterbitkan: 25 Juni 2024

*Penulis yang sesuai: moch.sugiri@itbu.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi kuat arus pada las laser terhadap ukuran kristal, kerapatan dislokasi, regangan kisi dan sifat mekanis pada baja karbon sedang serta kawat *filler* SKD 61. Peralatan las laser yang digunakan adalah *mold laser welding machine* "JAL" model JAL-UK-MW400. Kondisi proses pengelasan laser frekuensi 10 Hz, *pulse* 5,5, 6,5, dan 7,5 ms, dan kuat arus pengelasan 60, 70, dan 80 A. Kemudian, dilakukan proses PWHT-*Tempering* pada temperatur 700°C selama 2 jam. Hasil uji XRD menunjukkan bahwa ukuran kristal meningkat dengan peningkatan kuat arus dengan ukuran kristal tertinggi terdapat pada spesimen dengan kuat arus pengelasan 80 A sebesar 12.8428 nm dan ukuran kristal terkecil terdapat pada spesimen matriks sebesar 8.7155 nm. Akan tetapi, untuk nilai kerapatan dislokasi dan regangan kisi mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kuat arus pengelasan. Hasil uji sifat mekanik kekerasan dan kuat tarik menunjukkan bahwa setelah melalui proses PWHT terlihat bahwa nilai kekerasan dan kuat tarik mengalami penurunan, dimana sebelum proses PWHT nilai kekerasan dan kuat tarik tertinggi terdapat pada spesimen dengan kuat arus pengelasan 80 A di daerah pusat las, sebesar 388.46 HB dan 1340.187 MPa. Setelah melalui proses PWHT, nilai kekerasan dan kuat tarik tertinggi terdapat pada spesimen dengan kuat arus pengelasan 80 A di daerah pusat las, sebesar 232.07 HB dan 1011.09 MPa.

Kata Kunci: Baja Karbon Sedang M400; Kekerasan, Kuat Tarik, Las laser; Struktur Kristal.

Abstract

This study aims to determine the effect of variations in current strength in laser welding on crystallite size, dislocation density, lattice strain, and mechanical properties of medium carbon steel and SKD 61 filler wire. The laser welding equipment used is the "JAL" mold laser welding machine model JAL-UK-MW400. The condition of the laser welding process is 10 Hz, pulse 5.5, 6.5, and 7.5 ms, and the welding current is 60, 70, and 80 A. Then, the PWHT-*Tempering* process is carried out at a temperature of 700°C for 2 hours. XRD test results showed that the crystal size increased with increasing current strength, with the highest crystal size found in specimens with a welding current of 80 A of 12.8428 nm, and the smallest crystal size was found in matrix specimens of 8.7155 nm. However, the value of dislocation density and lattice strain decreased along with the increase in the strength of the welding current. The results of the mechanical strength and tensile strength test showed that after going through the PWHT process, it was seen that the hardness and tensile strength values decreased, whereas, before the PWHT process, the highest hardness and tensile strength values were found in specimens with a welding current of 80 A in the weld center area, amounting to 388.46 HB and 1340.187 MPa. After going through the PWHT process, the highest hardness and tensile strength values were found in specimens with a welding current of 60 A in the metal parent region, amounting to 232.07 HB and 1011.09 MPa.

Keywords: Crystal Structure; Hardness; Laser Welding; M400 Carbon Steel; Tensile Strength.

1. Pendahuluan

Molding atau pencetakan merupakan salah satu proses manufaktur yang banyak digunakan seiring dengan pertumbuhan sektor manufaktur yang semakin pesat. *Molding* sering digunakan untuk memproduksi produk-produk yang materialnya berupa plastik atau polimer. Industri yang sering menggunakan proses *molding* untuk memproduksi produk-produknya diantaranya industri otomotif, industri elektronik, industri makanan dan minuman, dan bangunan serta konstruksi [1]. Salah satu komponen yang digunakan pada proses *molding* adalah *mold* atau yang sering disebut dengan cetakan. *Mold* adalah bagian yang berpotensi mengalami kerusakan. Penyebab utama kegagalan atau cacat pada *mold* diantaranya adalah karena *thermal shock*, regangan mekanis, pembebanan siklik dan korosi yang mengakibatkan pemeriksaan panas, keausan, deformasi plastis, dan kelelahan (*fatigue*) [2], [3]. Salah satu solusi yang dapat dilakukan untuk memperbaiki kerusakan atau cacat pada *mold* adalah dengan pengelasan. Dengan jenis pengelasan yang bias digunakan adalah

jenis las laser [4], [5]. Baja karbon sedang biasa digunakan sebagai bahan dasar pembuatan *mold* dan mempunyai sifat mampu las yang relatif baik.

Pengelasan atau *welding* adalah metode penyambungan yang paling serbaguna dan realistis yang dapat diterapkan pada konstruksi produk di setiap bidang industry [6]– [8]. Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), adalah sumber panas yang memiliki kepadatan tinggi. Oleh karena itu *laser welding* diakui sebagai proses untuk menggabungkan material dengan sinar laser berkekuatan tinggi, kepadatan energi tinggi. Las laser memiliki beberapa kelebihan diantaranya memiliki hasil lasan yang sempit dan dalam, memiliki masukan panas yang rendah pada material di setiap sisi sambungan las, tingkat produksi tinggi, proses pengelasan dapat dilakukan saat akses terbatas dan hanya pada satu sisi, dan memiliki peluang desai komponen yang dapat ditingkatkan. Akan tetapi las laser juga memiliki beberapa kerugian diantara lain memerlukan sambungan yang pas dan dijepit dengan baik, memerlukan penempatan sinar yang akurat/sambungan yang lurus, mesin las tidak *portabel* dan biaya operasinya mahal.

Post weld heat treatment (PWHT) didefinisikan sebagai perlakuan panas apapun setelah pengelasan yang biasa digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat pengelasan. *Post weld heat treatment* terutama ditujukan sebagai *stress relief treatment* (pelepasan tegangan sisa). *Post weld heat treatment* diaplikasikan pada struktur baja yang dilas terutama untuk mengurangi tegangan sisa dan meminimalisir resiko getas (*brittle fracture*).

Tempering adalah satu proses dimana sebuah logam secara presisi dipanaskan dibawah temperatur kritis, sering di udara, vakum, atau atmosfer inert. Temperatur yang tepat bervariasi tergantung pada jumlah nilai kekerasan yang ingin dikurangi. Temperatur tinggi akan mengurangi kekerasan dan meningkatkan elastisitas dan plastisitas tetapi dapat mengurangi nilai kekuatan luluh dan kekuatan tarik. Temperatur yang lebih rendah akan mempertahankan sebagian besar kekerasan tetapi akan mengurangi kegetasan.

Secara proporsional kekuatan tarik berbanding lurus dengan kekerasan. Oleh karena itu hubungan kuat tarik (*ultimate tensile strength*) dan kekerasan skala Brinell dinyatakan dengan hubungan persamaan:

$$\text{Nilai kekerasan skala Brinell} \quad : \quad \text{BHN} = \frac{2P}{(\pi D)(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$\text{Kekuatan tarik (MPa)} \quad : \quad 3.45 \times \text{BHN}$$

Rumus perhitungan struktur kristal dapat dicari dengan menggunakan persamaan Debye Scherrer sebagai berikut.

$$\theta = \frac{2\theta}{2}$$

dimana θ adalah sudut difraksi (°)

Ukuran kristal (D) dapat dihitung melalui persamaan (4) [25], [27].

$$D = \frac{\lambda \times k}{\beta \times \cos \theta}$$

dimana λ adalah panjang gelombang XRD = 1.5406 Å, k adalah faktor betuk kristal, dan β adalah FWHM (*Ful width with half maximum*) 2θ (°)

Regangan kisi (ϵ) dapat dihitung melalui persamaan (5).

$$\epsilon = \frac{\beta}{4 \times \tan \theta}$$

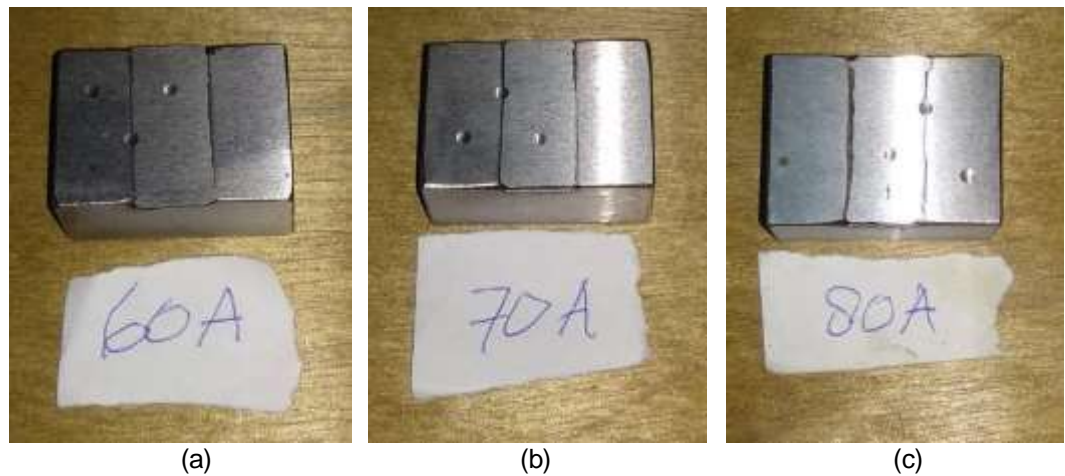
Lalu kerapatan dislokasi karena regangan kisi dapat dicari melalui persamaan (6) [29].

$$\rho = \frac{1}{D^2}$$

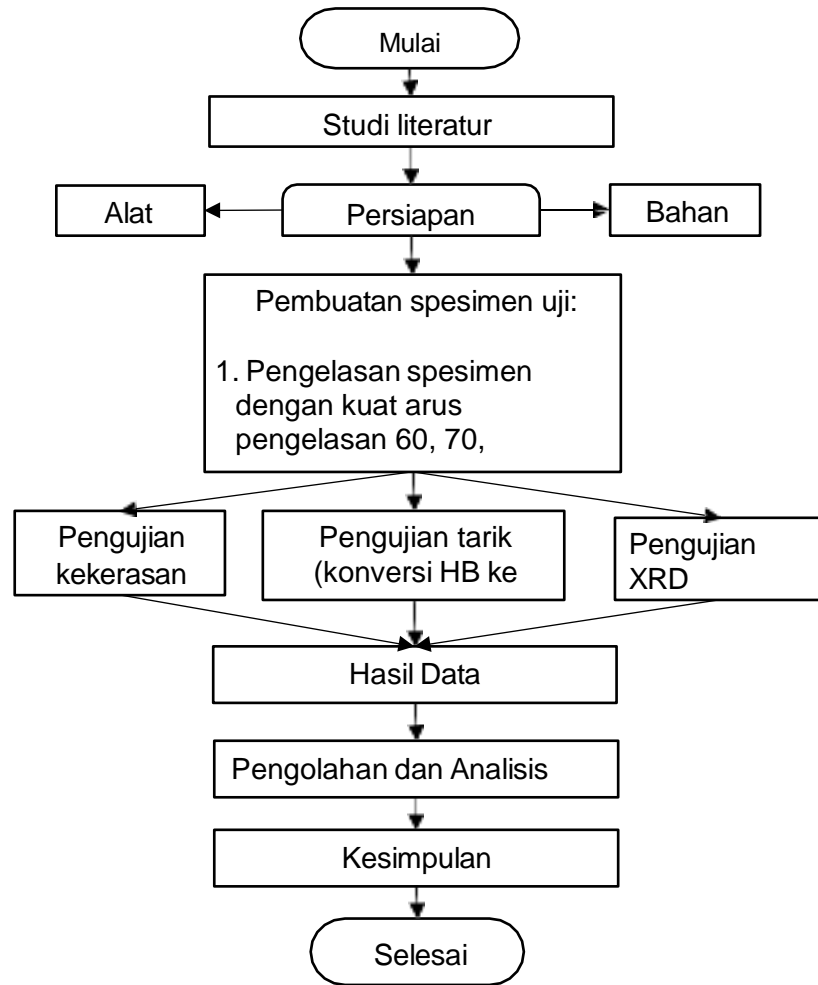
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi arus listrik 60,70 dan 80 A terhadap sifat mekanik yang meliputi kekerasan dan kuat tarik; dan struktur kristal yang meliputi ukuran kristal, regangan kisi, dan kerapatan dilokasi pada baja karbon sedang M400 dengan las laser.

2. Metode Penelitian

Material baja karbon sedang yang akan digunakan pada penelitian ini adalah baja M400 dengan dimensi 3 x 1 x 1 cm sebanyak 9 buah, dan kawat pengisi/*filler* yang akan digunakan pada saat pengelasan adalah kawat las SKD 61. Spesimen baja M400 akan dilas dengan variasi arus listrik 60, 70, dan 80 A. Hasil las laser pada baja M400 dan kawat *filler* SKD 61 dengan variasi arus listrik 60, 70, dan 80 A ditunjukkan pada gambar 1. Kemudian 3 diantaranya diterapkan proses PWHT-*Tempering* untuk membandingkan nilai kekerasan dan kuat tarik antara spesimen yang diterapkan proses PWHT-*Tempering* dan yang tidak. Proses PWHT-*Tempering* dilakukan menggunakan oven pemanas pada suhu 700°C selama 2 jam dan didinginkan dengan media udara hingga mencapai suhu ruang. Lalu semua spesimen diuji nilai kekerasan, kuat tarik, dan struktur kristal yang meliputi ukuran kristal, regangan kisi, dan kerapatan dislokasi. Diagram alir penelitian, oven pemanas, dan alat uji yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan oleh gambar 2-5.



Gambar 1. Hasil Las Laser pada Baja M400 dan kawat *filler* SKD 61 dengan Variasi Arus Listrik Pengelasan 60, 70, dan 80 A.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai Kekerasan Baja M400 dengan Skala Brinell

Data yang diperoleh dari hasil uji kekerasan skala Brinell baik pada spesimen yang diterapkan proses PWHT-*Tempering* maupun tidak dapat dilihat pada tabel 1 dan 2.

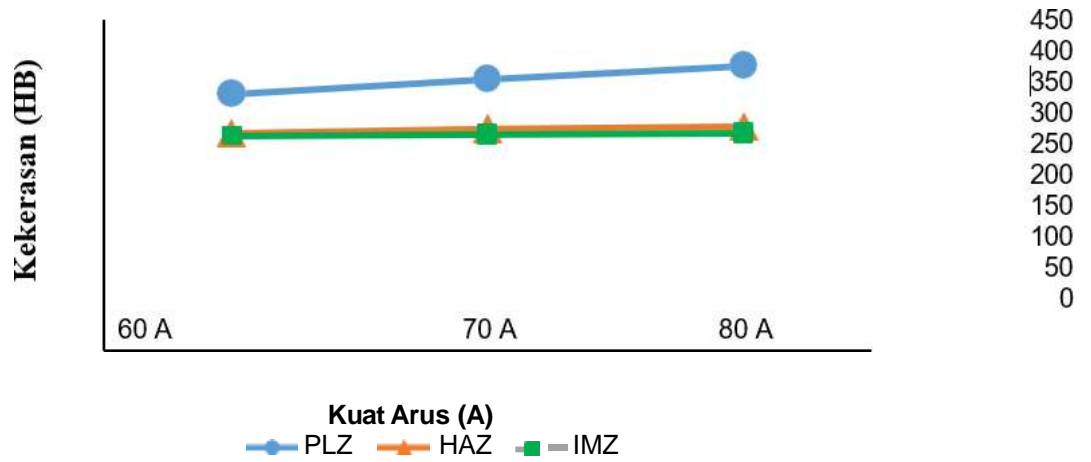
Tabel 1. Data Hasil Uji Kekerasan Skala Brinell setelah Pengelasan (Non PWHT)

Nomor Benda Kerja	Arus (A)	Pulsa (ms)	Frekuensi (Hz)	Data Kekerasan Brinell (HB)		
				PLZ	HAZ	IMZ
1	60	5,5	10	350.23	295.78	292.96
2	70	6,5	10	370.02	301.98	294.79
3	80	7,5	10	388.46	305.45	296.24

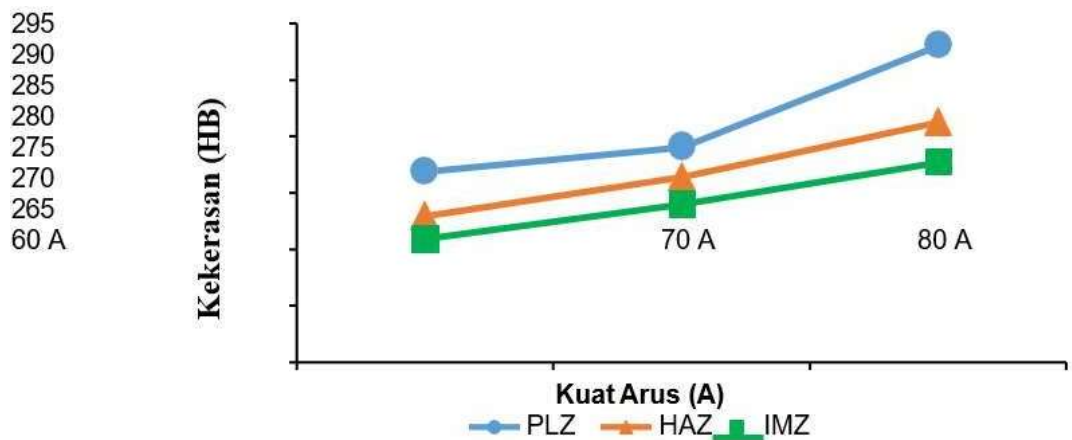
Tabel 2. Data Hasil Uji Kekerasan Skala Brinell setelah Proses PWHT-*Tempering*

Nomor Benda Kerja	Arus (A)	Pulsa (ms)	Frekuensi (Hz)	Data Kekerasan Brinell (HB)		
				PLZ	HAZ	IMZ
1A	60	5,5	10	281.96	277.95	275.95
2A	70	6,5	10	284.13	281.42	279.01

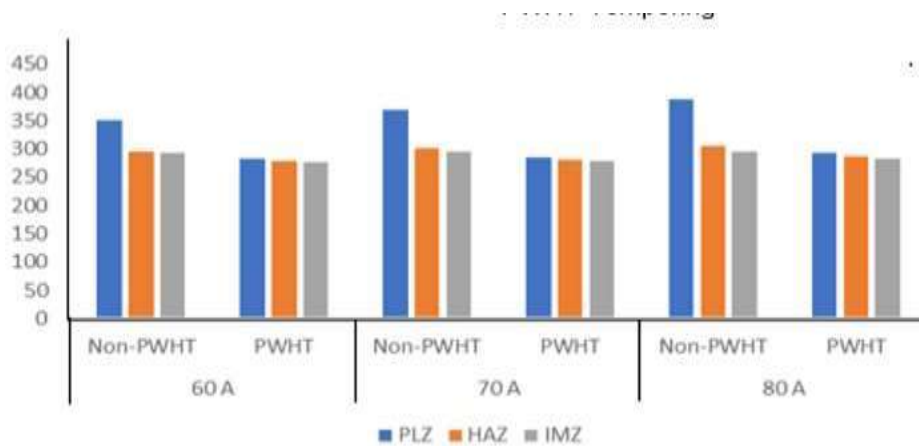
3A	80	7,5	10	293.07	286.32	282.77
----	----	-----	----	--------	--------	--------



Gambar 6. Grafik Hubungan Variasi Kuat Arus terhadap Kekerasan Baja Karbon Sedang



Gambar 7. Grafik Hubungan Variasi Kuat Arus terhadap Kekerasan Baja Karbon Sedang M400 setelah PWHT-Tempering



Gambar 8. Perbandingan Nilai Kekerasan Non-PWHT dan PWHT-Tempering /

Pada tabel 1 dan 2 dapat dilihat nilai kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen dengan kuat arus listrik pengelasan 80 A, di daerah pusat las, dan tanpa melalui proses PWHT-*Tempering* sebesar 388.46 HB. Dan nilai kekerasan terendah terdapat pada spesimen dengan kuat arus listrik pengelasan 60 A, di daerah induk *metal*, dan melalui proses PWHT-*Tempering* sebesar 275.95 A. Pada gambar 6 dan 7 terlihat bahwa nilai kekerasan di setiap area pengelasan bertambah seiring dengan peningkatan kuat arus listrik pengelasan. Akan tetapi, nilai kekerasan pada spesimen yang melalui proses PWHT-*Tempering* melalui penurunan jika dibandingkan dengan spesimen yang tidak melalui proses PWHT. Hal ini selaras dengan penelitian terdahulu yang menyatakan pertumbuhan butir memiliki dampak yang signifikan terhadap penurunan nilai kekerasan baja. Perlakuan ini dianggap berhasil dalam menghilangkan tegangan sisa akan tetapi mengurangi kekerasan di area pusat las dan area HAZ [31].

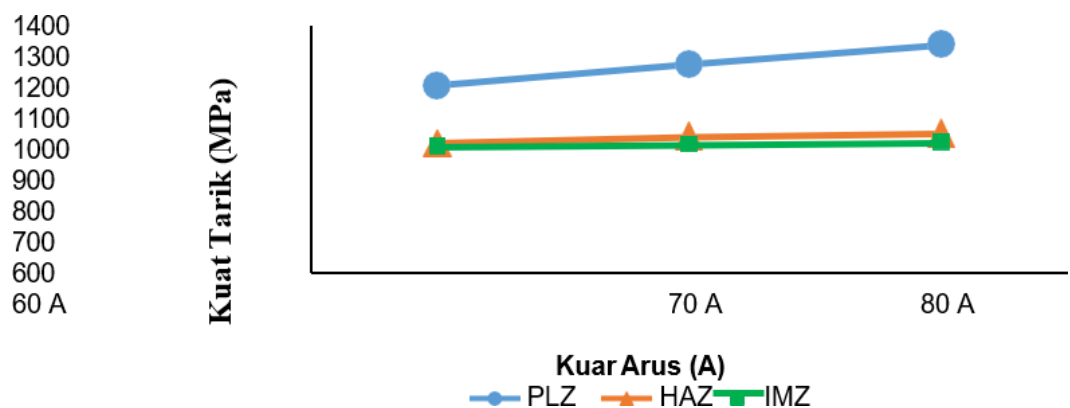
Nilai kuat tarik dihitung dengan menggunakan metode konversi kekerasan Brinell dengan menggunakan rumus yang ditunjukkan oleh nomor (2). Hasil perhitungan nilai kuat tarik ditunjukkan pada tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Data Hasil Uji Tarik setelah Pengelasan (Non-PWHT)

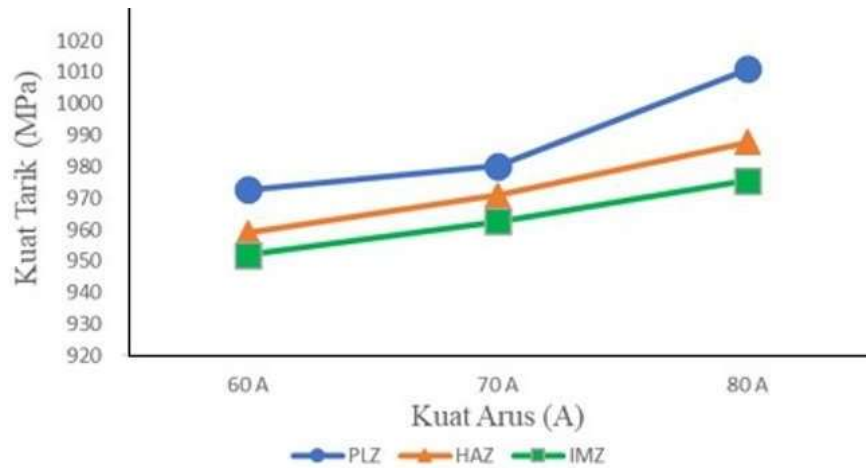
Nomor Benda Kerja	Arus (A)	Pulsa (ms)	Frekuensi (Hz)	Data Kuat Tarik (MPa)		
				PLZ	HAZ	IMZ
1	60	5,5	10	1208.94	1020.44	1010.74
2	70	6,5	10	1276.569	1041.83	1017.03
3	80	7,5	10	1340.187	1053.8	1022.83

Tabel 4. Data Hasil Uji Tarik setelah proses PWHT-*Tempering*

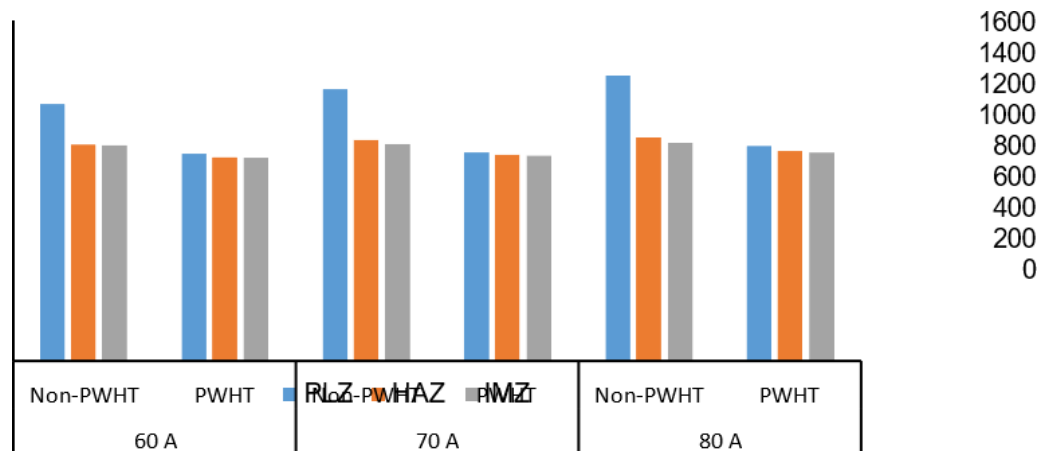
Nomor Benda Kerja	Arus (A)	Pulsa (ms)	Frekuensi (Hz)	Data Kuat Tarik (MPa)		
				PLZ	HAZ	IMZ
1A	60	5,5	10	972.762	958.928	952.028
2A	70	6,5	10	980.249	970.899	962.585
3A	80	7,5	10	1011.09	987.804	975.557



Gambar 9. Grafik Hubungan Variasi Kuat Arus terhadap Nilai Kuat Tarik Baja Karbon Sedang M400 setelah Pengelasan (Non-PWHT)



Gambar 10. Grafik Hubungan Variasi Kuat Arus terhadap Nilai Kuat Tarik Baja Karbon



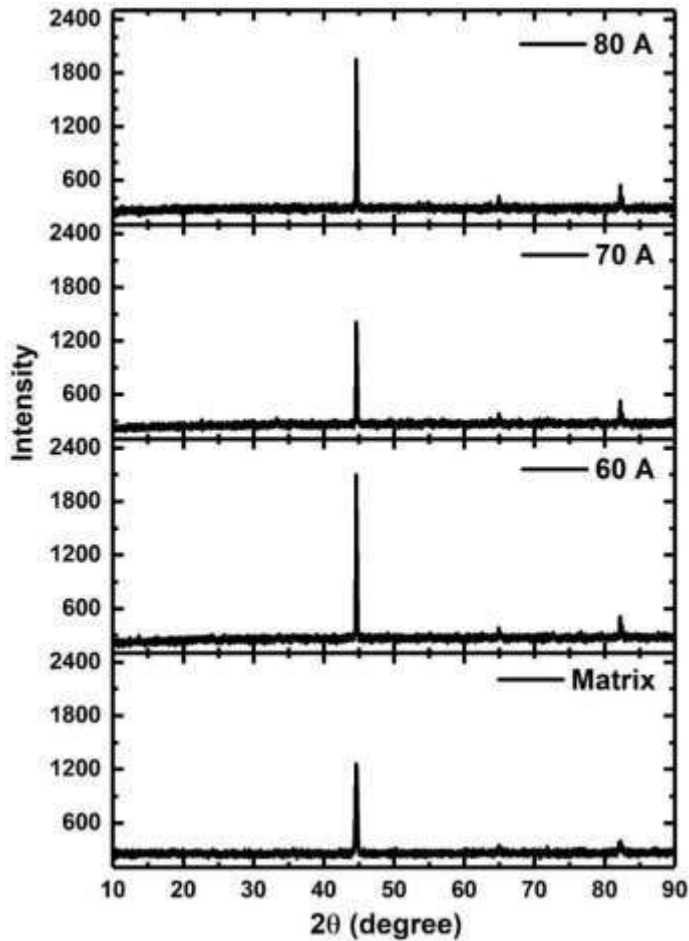
Gambar 11. Perbandingan Nilai Kuat Tarik Non-PWHT dan PWHT-Tempering

Pada tabel 3 dan 4 dapat dilihat nilai kuat tarik tertinggi terdapat pada spesimen dengan kuat arus listrik pengelasan 80 A, di daerah pusat las, dan tanpa diterapkan proses PWHT-*Tempering* dengan nilai kuat tarik sebesar 1340.187 MPa, sedangkan nilai kuat tarik terendah terdapat pada spesimen dengan kuat arus listrik pengelasan 60 A, di daerah induk *metal*, dan diterapkan proses PWHT-*Tempering*, sebesar 952.028 MPa. Pada gambar 9 dan 10 terlihat nilai kuat tarik pada semua daerah pengelasan meningkat seiring dengan peningkatan kuat arus listrik pengelasan. Namun, nilai kuat tarik pada spesimen yang diterapkan proses PWHT-*Tempering* mengalami penurunan jika dibandingkan dengan spesimen yang tidak diterapkan proses PWHT-*Tempering*. Hasil menunjukkan pola yang hampir sama dengan nilai kekerasan, dimana semua daerah pengelasan yang dilas dengan kuat arus 80 A terlihat memiliki nilai kuat tarik tertinggi. Hal ini membuktikan bahwa secara proporsional kekuatan tarik berbanding lurus dengan kekerasan. *Ukuran Kristal, Regangan Kisi, dan Kerapatan Dislokasi*

Data hasil pengujian Difraksi Sinar-X (XRD) berupa data-data seperti FWHM $2\theta(^{\circ})$ dan sudut utama $2\theta(^{\circ})$ ditunjukkan oleh gambar 12. Setelah data FWHM $2\theta(^{\circ})$ dan $2\theta(^{\circ})$ diperoleh, maka perhitungan dan pengolahan data dapat dilakukan. Data ukuran kristal, regangan kisi, dan keraatan dislokasi ditunjukkan pada tabel 5-9. Tabel 5-9 dan gambar 13-15 menunjukkan hubungan variasi arus listrik terhadap ukuran

Mochammad Sugiri, basugi wisnu

kristal, regangan kisi, dan kerapatan dislokasi baja M400. Gambar 13 menunjukkan bahwa ukuran kristal terkecil terdapat pada spesimen matriks dengan ukuran kristal sebesar 8.7155 nm dan terus bertambah seiring dengan peningkatan arus listrik, dan mencapai ukuran kristal tertinggi pada spesimen dengan kuat arus listrik pengelasan 80 A, sebesar 12.8428 nm. Gambar 14 menunjukkan regangan kisi tertinggi terdapat pada spesimen dengan kuat arus listrik pengelasan 60 A, sebesar 2.6841 % dan terus menurun seiring dengan peningkatan arus listrik, hingga mencapai regangan kisi terendah pada spesimen dengan kuat arus listrik pengelasan sebesar 0.0210 %. Gambar 15 menunjukkan kerapatan dislokasi tertinggi terdapat pada spesimen matriks, sebesar 0.0675 garis/mm² dan mencapai kerapatan dislokasi terendah pada spesimen dengan kuat arus listrik pengelasan 70 A, sebesar 0.0173 A.



Gambar 12. Difraktogram Baja Karbon Sedang M400 dan kawat las SKD 61, dengan Variasi Arus Listrik 60 A, 70 A, 80 A, dan Matriks

Tabel 5. Struktur Kristal pada Spesimen dengan Kuat Arus Pengelasan 60 A

No.	Pos. [2θ .]	β FWHM Left $2\theta(^{\circ})$	D Ukuran Kristal (nm)	ϵ Regangan Kisi (%)	ρ Kerapatan Dislokasi (Garis/mm ²)
1	44.7552	0.0612	20,94977986	0,006299208	0,002278458
2	64.9924	0.3264	3,582859627	0,051977325	0,07790053
3	82.2071	0.102	10,24303245	0,02224785	0,009531097
Rata-rata			11,59189064	2,684146126	0,029903362

Tabel 6. Struktur Kristal pada Spesimen dengan Kuat Arus Pengelasan 70 A

No.	Pos. [2θ .]	β FWHM Left $2\theta(^{\circ})$	D Ukuran Kristal (nm)	ϵ Regangan Kisi (%)	
1	44,7685	0,0612	20,94877863	0,006301285	
2	64,9569	0,2448	4,778088628	0,038956347	
3	82,2279	0,0816	12,80176268	0,017804803	
Rata-rata			12,84287665	2,102081166	

Tabel 7. Struktur Kristal Spesimen dengan Kuat Arus Pengelasan 80 A

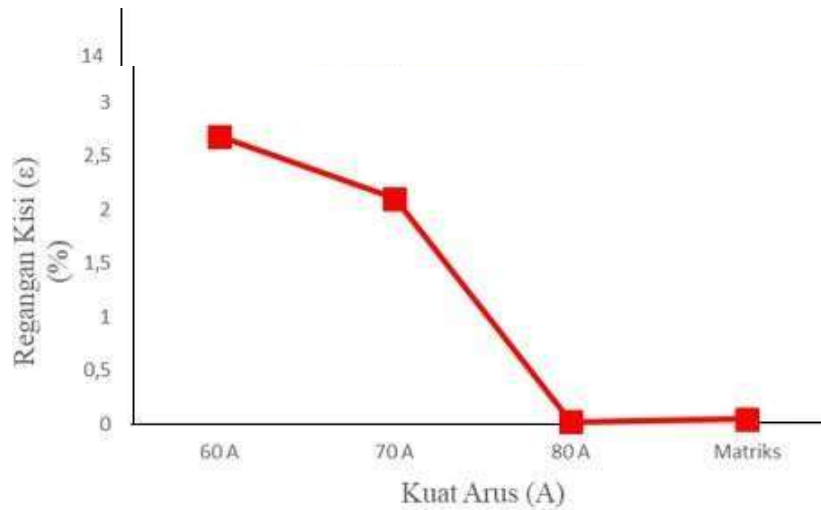
No.	Pos. [2θ .]	β FWHM Left $2\theta(^{\circ})$	D Ukuran Kristal (nm)	ϵ Regangan Kisi (%)	ρ Kerapatan Dislokasi (Garis/mm ²)
1	44,7672	0,0612	20,94887651	0,006301082	0,002278655
2	65,0166	0,2448	4,776503441	0,039001165	0,043830842
3	82,2326	0,0816	12,8013044	0,017806277	0,006102272
Rata-rata			12,84222811	0,021036175	0,017403923

Tabel 8. Struktur Kristal Spesimen pada Matriks

No.	Pos. [2θ .]	β FWHM Left $2\theta(^{\circ})$	D Ukuran Kristal (nm)	ϵ Regangan Kisi (%)	ρ Kerapatan Dislokasi (Garis/mm ²)
1	44,64	0,0669	19,17274365	0,006866244	0,002720392
2	64,953	0,2676	4,371081597	0,042581435	0,052338609
3	82,1715	0,4015	2,602920166	0,087518741	0,147597263
Rata-rata			8,715581805	0,045655473	0,067552088

Tabel 9. Data Perhitungan Struktur Kristal

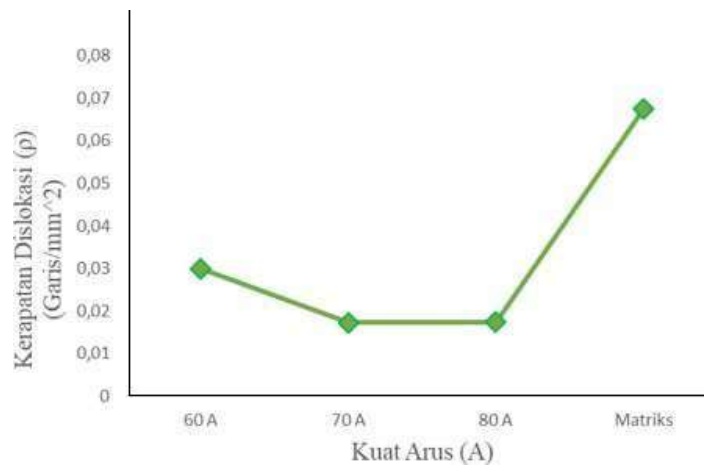
Arus (A)	D Ukuran kristal (nm)	ϵ Regangan Kisi (%)	ρ Kerapatan Dislokasi (Garis/mm ²)
60	11.5918	2.6841	0.0299
70	12.8422	2.1020	0.0173
80	12.8428	0.0210	0.0174
Matriks	8.7155	0.0456	0.0675



Gambar 13. Grafik Hubungan Variasi Arus Listrik terhadap Ukuran Kristal Baja Karbon Sedang M400

Gambar 14. Grafik Hubungan Variasi Arus Listrik terhadap Regangan Kisi Baja Karbon Sedang M400

Gambar 15. Grafik Hubungan Variasi Arus Listrik terhadap Kerapatan Dislokasi Baja Karbon Sedang M400



4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa ata diperoleh bahwa ukuran kristal dari XRD menunjukkan peningkatan seiring dengan peningkatan kuat arus pengelasan. Terlihat bawa ukuran kristal terbesar terdapat pada specimen dengan kuat arus pengelasan 80 A, sebesar 12.8428 nm dan ukuran kristal terkecil pada specimen matriks, sebesar 8.7155 nm. Namun, nilai kerapatan dislokasi dan regangan kisi mengalami penurunan seiring dengan peningkatan arus pengelasan. Terlihat regangan kisi terbesar pada specimen dengan kuat arus pengelasan 60 A, sebesar 2.6841 %, dan kerapatan dislokasi terkecil pada specimen dengan kuat arus pengelasan 80 A, sebesar 0.0456 %. Sedangkan regangan kisi terbesar pada specimen matriks, sebesar 0.0675 garis/mm² dan kerapatan dislokasi terkecil pada specimen dengan kuat arus pengelasan 70 A, sebesar 0.0173 garis/mm². Nilai kekerasan mengalami penurunan setelah proses PWHT-*Tempering*, dimana sebelum proses PWHT nilai kekerasan tertinggi terdapat pada specimen dengan kuat arus pengelasan 80 A di daerah pusat las, sebesar 388.46 HB dan setelah melalui proses

Mochammad Sugiri, basugi wisnu

PWHT nilai kekerasan tertinggi terdapat pada specimen dengan kuat arus pengelasan 80 di daerah pusat las, sebesar 232.07 HB. Nilai kuat tarik mengalami penurunan setelah proses PWHT-*Tempering*, dimana sebelum proses PWHT nilai kuat tarik tertinggi terdapat pada specimen dengan dengan kuat arus pengelasan 80 A di daerah pusat las, sebesar 1340.187 MPa, dan setelah proses PWHT nilai kuat tarik tertinggi terdapat pada specimen dengan kuat arus pengelasan 80 A di daerah pusat las, sebesar 1011.09 MPa.

5. REFERENSI

- [1] H. He, Y. Xing, R. Wang, Y. Lu, L. Zhang, and F. Li, "Optimization design of cooling system for injection molding mold of non-pneumatic tire," *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 42, no. 1, pp. 87–98, 2023.
 - [2] S. Jhavar, C. P. Paul, and N. K. Jain, "Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 34, no. September, pp. 519–535, 2013, doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.09.006.
 - [3] A. J. Zulfikar, D. A. A. Ritonga, S. Pranoto, F. A. K. Nasution, Z. Arif, and J. Junaidi, "Analisis Kekuatan Mekanik Komposit Polimer Diperkuat Serbuk Kulit Kerang," *J. Rekayasa Mater. Manufaktur dan Energi*, vol. 6, no. 1, pp. 30–40, 2023.
 - [4] H. Widiastuti, S. E. Surbakti, F. Restu, M. hasan Albana, and I. Saputra, "Identifikasi Cacat Produk Dan Kerusakan Mold Pada Proses Plastic Injection Molding," *J. Teknol. dan Ris. Terap.*, vol. 1, no. 2, pp. 76–80, 2019.
 - [5] D. Derlini and A. J. Zulfikar, "Penyelidikan Kegagalan pada Alat Pemisah Karet Alam Jenis LRH 410," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 3, pp. 51–61, 2022.
 - [6] C. Steimbregger, N. Gubeljak, T. Vuherer, N. Enzinger, W. Ernst, and M. Chapetti, "Effect of welding processes on the fatigue behaviour of ultra-high strength steel butt-welded joints," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 257, no. 1, pp. 108–124, 2022.
 - [7] R. A. Purba, A. J. Zulfikar, and I. Iswandi, "Analisis Kekuatan Komposit Laminat Hybrid Jute E-Glass Berdasarkan Pola Kerusakan dengan Metode Split Tensile Test," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 3, pp. 83–91, 2022.
 - [8] M. I. Tambusay, A. J. Zulfikar, and I. Iswandi, "Analisis Metode Split Tensile Test Komposit Laminat Hybrid Jute E-Glass Akibat Beban Tarik Beton Kolom Silinder," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 2, pp. 45–54, 2022.
 - [9] R. G. D. da Silva, E. dos S. Magalhães, S. M. M. de L. e Silva, L. E. dos S. Paes, and M. Pereira, "Estimating the absorption efficiency in a laser welding process using a nonlinear inverse problem method," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 183, no. 2, pp. 78–89, 2023.
 - [10] M. A. Rasyid, A. J. Zulfikar, and I. Iswandi, "Analisis Kekuatan Tarik Komposit Laminat Jute Berdasarkan Pola Kerusakan Kolom Silinder Metode Split Tensile Test Analysis," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 2, pp. 27–34, 2022.
 - [11] P. A. T. Lubis, A. J. Zulfikar, and I. Iswandi, "Analisis Kekuatan Tarik Belah Komposit Laminat Jute sebagai Penguat Beton Kolom Silinder Berdasarkan Metode Penyerapan Energi Bahan," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 2, pp. 55–64, 2022.
- S. Nisar, A. Noor, A. Shah, U. Siddiqui, and S. Z. Khan, "Optimization of process parameters for laser welding of A5083 aluminium alloy," *Opt. Laser Technol.*, vol. 163, no.