



Available online at www.jurnal.untidar.ac.id

JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING

Journal homepage: <http://jurnal.untidar.ac.id/index.php/mechanical/index>



Korelasi Kuat Arus *Laser Welding* Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja NAK 80

Rizal Oktaviano^{a,*}, Nurhadi^a, Adityo Noor Setyo Hadi Darmo^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Tidar, Jl. Kapten Supratman no. 39, Potrobangsari, Magelang Utara, Magelang, 56114 Indonesia

*rizaloktaviano57@gmail.com

Keyword:

Laser Welding,
Current Strength,
Hardness,
Microstructure,
NAK80 steel

ABSTRACT

The shortcomings of GMAW welding are still found distortion defects, and HAZ is too wide, so Nd: YAG laser welding is one of the solutions to repair injection moulds. The purpose of this study was to determine the correlation of variations in laser welding current strength to the mechanical properties and microstructure of NAK 80 steel used in injection moulds. The research was conducted using experimental method. The tool used was Nd:YAG laser welding with model HT-WY180-Mk. The materials used were NAK 80 steel and NAK 80 filler with a diameter of 0.4 mm, while the current strengths used were 225 A, 250 A and 275 A. The test results show a correlation of variations in current strength to the mechanical properties and microstructure of NAK 80 steel, with hardness increasing with current strength from 382.9029-502.5802 VHN at 225 A to 399.8288-521.4778 VHN at 275 A across the base metal, weld metal, and HAZ areas (full values in Table 2). Significant microstructure changes occur at a current strength of 275 A in the HAZ area, namely with the appearance of cementite and bainite phases, while the lower the current strength the phases are dominated by cementite and pearlite. The reason is because the laser welding process has the characteristics of high heat energy intensity in a small area and short time. The higher the heat input or current strength used will affect changes in hardness values and changes in microstructure until the appearance of cementite and bainite phases.

Kata Kunci:

Laser Welding,
Kuat Arus,
Kekerasan,
Struktur Mikro,
Baja NAK80

ABSTRAK

Kekurangan las GMAW yaitu masih ditemukannya cacat distorsi, dan HAZ yang terlalu lebar, sehingga laser welding Nd:YAG menjadi salah satu solusi perbaikan mold injeksi. Tujuan penelitian ini mengetahui korelasi variasi kuat arus laser welding terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja NAK 80 yang digunakan pada mold injeksi. Penelitian dilakukan dengan metode eksperimental. Alat yang digunakan laser welding Nd:YAG dengan model HT-WY180-Mk. Bahan yang digunakan baja NAK 80 dan filler NAK 80 dengan diameter 0,4 mm, sedangkan kuat arus yang

digunakan sebesar 225 A, 250 A dan 275 A. Hasil pengujian menunjukkan adanya korelasi variasi kuat arus terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja NAK 80, dengan kekerasan meningkat seiring kuat arus dari 382,9029–502,5802 VHN pada 225 A hingga 399,8288–521,4778 VHN pada 275 A di daerah base metal, weld metal, dan HAZ (nilai lengkap pada Tabel 2). Perubahan struktur mikro yang signifikan terjadi pada kuat arus 275 A di daerah HAZ yaitu dengan munculnya fasa sementit dan bainit, sedangkan semakin turun kuat arus fasa didominasi sementit dan perlit. Penyebabnya karena proses laser welding memiliki karakteristik intensitas energi panas yang tinggi pada area yang kecil dan waktu yang singkat. Semakin tinggi heat input atau kuat arus yang digunakan akan berpengaruh terhadap perubahan nilai kekerasan dan perubahan struktur mikro hingga munculnya fasa sementit dan bainit.

PENDAHULUAN

Di bidang industri terdapat 7 jenis pengelasan yang sering digunakan, salah satunya yaitu *laser welding Neodymium-Doped Yttrium Aluminum Garnet (Nd:YAG)*. *Laser Welding* adalah metode penyambungan material dengan memanfaatkan sinar radiasi yang ditransmisikan kepada material[1]. Metode *laser welding Nd:YAG* ini menggunakan sinar laser yang berdenyut dengan daya tinggi yang dihasilkan dari sinar kristal laser. *Laser Welding* dapat digunakan untuk aplikasi benda mikroskopis dimana memerlukan tingkat presisi yang tinggi. Salah satu contoh benda yang memerlukan tingkat presisi tinggi yaitu *mold* atau cetakan. Pada saat ini *mold* memiliki bentuk yang cukup rumit karena harus mengikuti desain produk plastik yang beragam sehingga ada beberapa bagian yang memiliki perbedaan ketahanan terhadap tekanan mesin ataupun tekanan plastik yang diinjeksikan[2]. Faktor utama yang menyebabkan terjadinya kerusakan pada *mold* yaitu adanya *thermal shock*, regangan mekanis, dan korosi sehingga dapat menimbulkan *deformasi* plastis, kelelahan, dan keausan[3].

Dalam penggunaannya tentunya *mold* akan mengalami kerusakan akibat faktor umur ataupun faktor kesalahan lainya sehingga sangat perlu dilakukanya perbaikan. Cacat yang terjadi pada permukaan rongga cetak dapat diperbaiki dengan melakukan pengelasan pada bagian yang cacat tersebut yang sering disebut *repair welding*[4]. Proses ini digunakan karena memiliki waktu yang singkat dan biaya yang lebih terjangkau daripada harus membuat baru keseluruhan bagian yang mengalami kerusakan. Pengelasan laser memiliki penetrasi yang lebih rendah dari pada las GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) sehingga pengelasan tidak akan mengenai bagian *mold* yang tidak memerlukan las maupun logam isianya. Selain itu masih ditemukan cacat pada hasil pengelasan seperti visual yang tidak sesuai standard acuan, distorsi, HAZ yang terlalu lebar, dan lain-lain[5]. Untuk saat ini pengelasan menggunakan *laser welding* bisa menjadi solusinya, karena memiliki kemampuan membuat bidang penetrasi yang kecil mulai dari diameter 0.1 mm sampai 2.0 mm dan mampu mengelas terhadap material keras seperti NAK80[2].

Berdasarkan uraian latar belakang dan penelitian sejenis sebelumnya penulis tertarik untuk mengamati korelasi kuat arus *laser welding* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja NAK80. Pengelasan laser pada baja NAK80 menggunakan variasi kuat arus 225 A, 250 A, dan 275 A. Setelah dilakukanya pengelasan laser material selanjutnya akan dilakukan pengujian kekerasan menggunakan uji kekerasan *vickers* dan uji struktur mikro di daerah HAZ yang terjadi pada material.

METODE

Metode yang dipakai dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Material yang dipakai untuk spesimen pada *laser welding Nd:YAG* adalah baja NAK80.

Proses *laser welding* menggunakan tiga variasi kuat arus yaitu 225A, 250A, dan 275A. Pengambilan nilai sifat mekanik pada penelitian ini berfokus pada nilai kekerasan material hasil pengelasan. Pengambilan nilai kekerasan melalui uji kekerasan *vickers* dan pengamatan morfologi pengelasan melalui uji struktur mikro.

Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat beberapa variabel yaitu sebagai berikut :

A. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kuat arus yang akan digunakan dalam *laser welding* Nd:YAG yaitu sebesar 225A, 250A, dan 275A.

B. Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kekerasan material uji kekerasan *vickers* dan struktur mikro material.

C. Variabel Kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah:

1. Mesin *laser welding* dengan model HT-WY180-Mk.
2. Material yang digunakan sebagai spesimen yaitu baja NAK80
3. Menggunakan *filler* dengan jenis NAK80 dengan diameter 0,4 mm
4. *Pulse width* pada mesin laser 4,5 ms
5. Frekuensi yang digunakan 9 Hz
6. *Spot size* yang digunakan 1,2 mm

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu baja NAK 80 sebagai material spesimen dengan ukuran 10 mm × 6 mm × 55 mm, *filler* dengan jenis NAK 80 berdiameter 0,4 mm, cairan resin, larutan tambahan asam nitrat dan alkohol. Peralatan yang dibutuhkan yaitu *laser welding* Nd:YAG, *vickers hardness test*, dan mikroskop optik.

Prosedur Penelitian

1. Preparasi Spesimen

Dalam penelitian ini, proses pembuatan spesimen dilakukan di Laboratorium Universitas Tidar, Kota Magelang menggunakan *cutting machine* dengan ukuran akhir 6 mm × 10 mm × 27,5 mm (Gambar 1).



Gambar 1. Pemotongan specimen

Spesimen selanjutnya dilakukan proses *machining* untuk membuat kampuh *double V* sebagai tempat sambungan *laser welding* (Gambar 2).



Gambar 2. Hasil kampuh *double V*

2. Proses *Laser Welding*

Proses laser welding dilakukan di PT. Lastek Dwijasarana Indonesia, Surakarta, menggunakan mesin laser welding Nd:YAG model HT-WY180-Mk. Parameter pengelasan diatur sesuai ketentuan, kemudian titik laser difokuskan ke filler dan material untuk melelehkan filler secara presisi dan perlahan (Gambar 3).



Gambar 3. Proses *laser welding*

Hasil proses *laser welding* menggunakan variasi kuat arus 225 A, 250 A, dan 275 A ditunjukkan pada gambar 4.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4. Hasil *laser welding* dengan kuat arus (a) 225A, (b) 250 A, (c) 275A

3. Proses Pengujian Kekerasan *Vickers*

Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Tidar, diawali dengan mounting ketiga spesimen untuk mempermudah pengujian (Gambar 5).



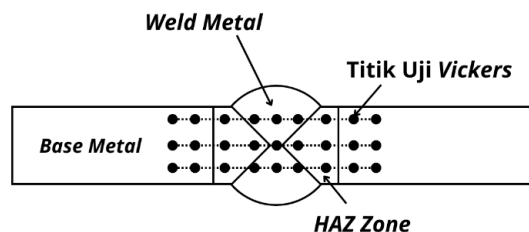
Gambar 5. Proses *mounting* uji kekerasan

Setelah dilakukannya proses *mounting* ketiga spesimen dilakukan proses pengamplasan secara bersamaan. Kemudian spesimen digosok kembali menggunakan autosol hingga permukaan benda berubah menjadi mengkilap. Hasil proses pengamplasan dan autosol ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil proses pengamplasan dan autosol

Langkah berikutnya yaitu mencekam spesimen padaudukan alat *vickers hardness test*. Atur pembebanan indentasi sebesar 200 gf dan atur waktu pembebanan selama 15 detik. Pengujian kekerasan *vickers* dilakukan pada bagian *base metal*, HAZ, dan *weld metal* disetiap spesimen. Titik pengujian ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Titik pengujian kekerasan *Vickers*

Proses selanjutnya yaitu menghitung luas permukaan hasil penjejakan dan memasukkannya kedalam rumus. Pengujian ini dilakukan sebelum dan sesudah dilakukannya *laser welding* dengan kuat arus 225 A, 250 A, dan 275 A. Proses pengujian kekerasan *vickers* ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Proses pengujian kekerasan *vickers*

4. Proses Pengujian Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro dilakukan di laboratorium kimia dan biologi Universitas Tidar. Spesimen disiapkan melalui mounting atau resin, pengamplasan, dan penggosokan autosol hingga mengkilat dan rata. Proses etsa kemudian dilakukan menggunakan campuran alkohol dan HNO_3 (1:10) yang dioleskan ke permukaan spesimen selama 15 detik hingga warna berubah, lalu dibersihkan dengan alkohol (Gambar 9).



Gambar 9. Proses etsa

Langkah terakhir yaitu dengan meletakkan spesimen padaudukan mikroskop optic dengan lensa perbesaran $50\times$ untuk melihat fasa yang ada pada spesimen. Hasil foto struktur mirko akan langsung tersimpan pada komputer pengujian. Proses pengujian ditunjukkan gambar 10.



Gambar 10. Daerah pengujian struktur mikro

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan *vickers* dilakukan pada bagian *base metal*, HAZ, dan *weld metal* disetiap spesimen. Pengujian ini dilakukan sebelum dan sesudah dilakukanya *laser welding* dengan kuat arus 225 A, 250 A, dan 275 A. Berikut adalah hasil pengujian raw material dari baja NAK 80 yang digunakan sebagai spesimen *laser welding* dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji kekerasan *vickers raw material*

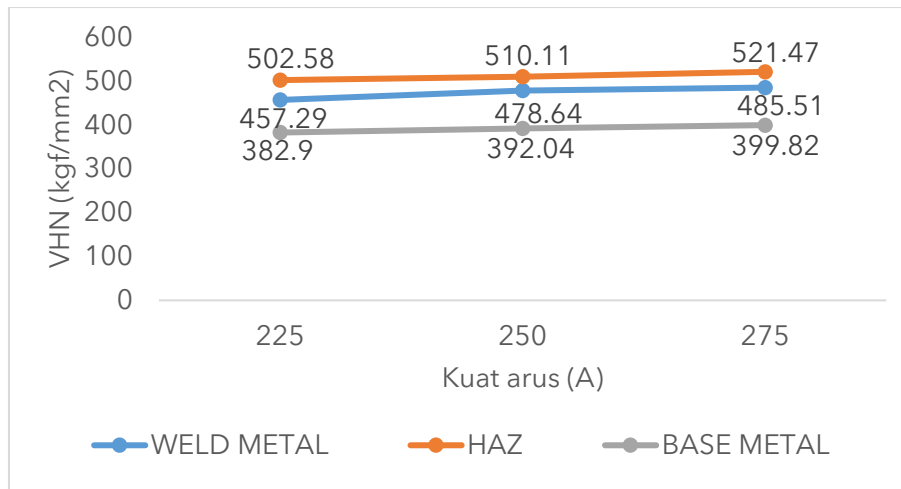
Titik Uji	Raw Material			VHN (kgf/mm ²)
	D1 (μm)	D2 (μm)	Average ² (mm ²)	
1	31,12	31,2	0,000971	381,8958
2	30,97	31,17	0,000965	384,1114
3	30,83	31,26	0,000964	384,7303
			Average	383,5792

Berdasarkan hasil uji kekerasan *vickers* pada *raw material laser welding*, didapatkan hasil dengan rata-rata nilai 383,57 VHN. Hal ini sesuai dengan standar acuan baja NAK 80 [6] yang menyatakan nilai kekerasan dari baja NAK 80 dengan nilai 40 HRC atau sama dengan 380 VHN. Selanjutnya dilakukan pengujian pada *base metal*, HAZ, dan *weld metal*. Hasil pengujian kekerasan *vickers* pada bagian *base metal*, HAZ, dan *weld metal* disetiap parameter kuat arus dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil uji kekerasan *vickers*

Titik Uji	Kuat Arus 225 A (VHN)	Kuat Arus 250 A (VHN)	Kuat Arus 275 A (VHN)
<i>Base Metal</i>	382,9029	392,0443	399,8288
<i>Weld Metal</i>	457,295	478,6415	485,5191
<i>HAZ</i>	502,5802	510,111	521,4778

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan *vickers* pada spesimen *laser welding* dengan kuat arus 225 A, 250 A, dan 275 A nilai kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen *laser welding* dengan variasi kuat arus 275 A di daerah HAZ sedangkan nilai kekerasan terendah terdapat pada kuat arus 225 A di daerah *base metal*. Pada kuat arus 275 A diperoleh nilai daerah *base metal* sebesar 399,8288 VHN, *weld metal* 485,5191 VHN, daerah HAZ 521,4778 VHN. Pada kuat arus 250 A diperoleh kekerasan daerah *base metal* sebesar 392,0443 VHN, daerah *weld metal* 478,6415 VHN, dan daerah HAZ 510,111 VHN. Pada kuat arus 225 A, meliputi daerah *base metal* 382,9029 VHN, daerah *weld metal* 457,295 VHN, dan pada daerah HAZ 502,5802 VHN. Grafik pengujian kekerasan *vickers* ditunjukkan pada gambar 11.

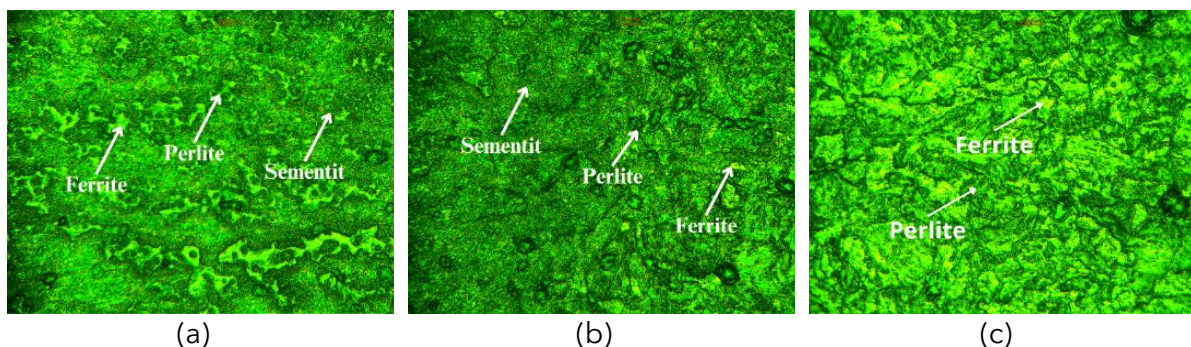


Gambar 11. Hubungan kuat arus terhadap kekerasan

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan *vickers* pada hasil *laser welding* dengan variasi kuat arus 225 A, 250 A dan 275 A memiliki nilai yang berbeda-beda. Perbedaan ini sangat terlihat di bagian *weld metal*, HAZ, dan *base metal*. Pada hasil pengelasan dengan kuat arus 275 A memiliki kekerasan yang tertinggi dibandingkan dengan kuat arus 225 A dan 250 A. Pada bagian HAZ dari ketiga spesimen yang berbeda kuat arus juga mengalami kenaikan nilai kekerasan sekitar 37% dari kekerasan *raw material* atau *base metal*. Hal ini selaras dengan penelitian [7], yang menyatakan bahwa nilai kekerasan pada daerah HAZ mengalami peningkatan hingga 62% dibandingkan dengan kekerasan bahan dasar karena terjadinya pendinginan berlangsung dari bagian *base metal* yang tidak mengalami pemanasan; perbedaan besaran kenaikan antara kedua penelitian ini wajar mengingat perbedaan material dan kondisi pengelasan yang digunakan. Pada perbedaan nilai kekerasan pada spesimen *laser welding* juga disebabkan oleh variasi kuat arus yang menghasilkan *heat input* dan persebaran panas yang berbeda. Hal ini selaras dengan pendapat [8], [9], [10], [11] yang menunjukkan bahwa semakin besar kuat arus akan semakin tinggi perubahan nilai kekerasan, serta sejalan dengan temuan [9] bahwa distribusi kekerasan pada sambungan las berpengaruh terhadap kekuatan sambungan tersebut.

2. Hasil Uji Struktur Mikro

a. Kuat arus 225 A

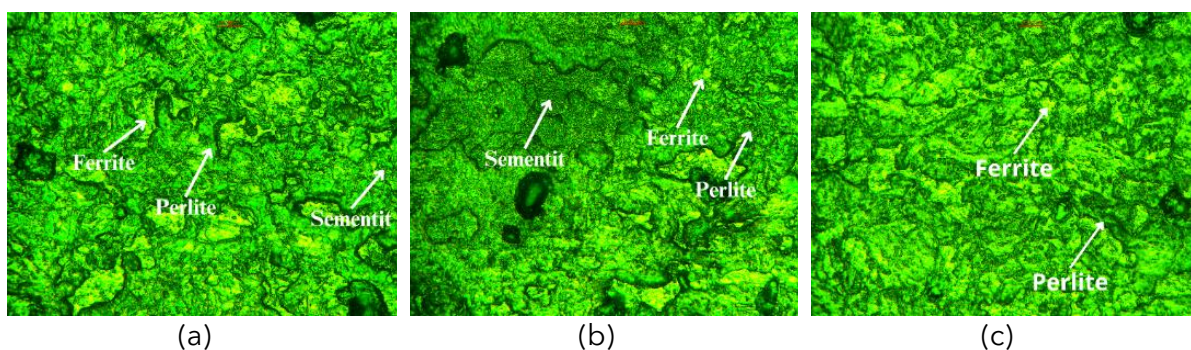


Gambar 12. Struktur Mikro kuat arus 225 A (a) fasa *weld metal*, (b) fasa HAZ, (c) fasa *base metal*

Pada Gambar 12a, 12b, dan 12c menunjukkan gambar fasa yang terdapat pada sambungan *laser welding* dengan menggunakan kuat arus 225 A. Struktur mikro yang terlihat pada gambar tersebut yaitu ferrite, perlite, dan sementit. Pada daerah *weld metal*

fasa didominasi dengan sementit dan perlite. Daerah sementit terlihat lebih banyak di daerah *weld metal* yang berupa tampilan titik titik halus dan gelap. Pada daerah HAZ gambar 12b struktur yang terbentuk yaitu *perlite* dan *ferrite*. Fasa *perlite* terlihat lebih banyak dibandingkan fasa *ferrite*. Fasa *perlite* biasanya berbentuk bergelombang atau berwarna gelap terang. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada bagian HAZ merupakan bagian yang kuat dan keras. Pada bagian *base metal* terlihat fasa *ferrite* dan *perlite*. Pada bagian tersebut lebih didominasi dengan fasa *ferrite* yang berwarna terang atau butiran poligonal. Banyaknya fasa *ferrite* menunjukkan bahwa base metal memiliki sifat yang ulet [12]. Perubahan struktur mikro ini disebabkan oleh laju pendinginan yang berbeda karena dipengaruhi jenis dan ketebalan material hal tersebut sesuai dengan pernyataan [5] yang menyatakan bahwa hal yang mempengaruhi laju pendinginan yaitu media dan ketebalan material yang digunakan.

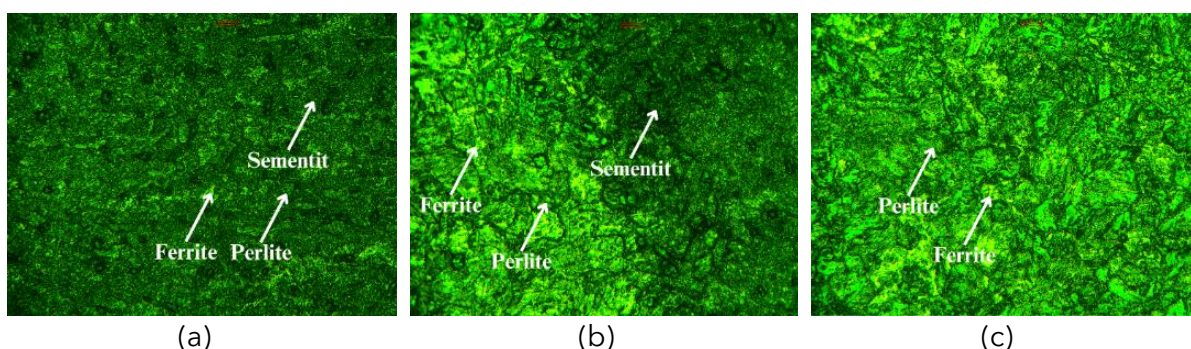
b. Kuat arus 250 A



Gambar 13. Struktur Mikro kuat arus 250 A (a) fasa *weld metal*, (b) fasa HAZ, (c) fasa *base metal*

Pada gambar 13a, 13b, dan 13c merupakan hasil foto struktur mikro dari sambungan laser welding dengan kuat arus 250 A. Pada gambar 13a fasa *weld metal* meliputi ferrite, perlite, dan sementit. Fasa yang mendominasi pada bagian tersebut yaitu perlite dan sementit. Banyaknya fasa *sementit* dan *perlite* menunjukkan bagian las yang cukup keras. Hal tersebut terjadi karena panas dari kuat arus yang digunakan cukup besar. Hal tersebut menyebabkan daerah *weld metal* menjadi sangat panas dan terpusat pada daerah *center weld metal*, sehingga pendinginan sangat cepat terjadi pada bagian tersebut. Pada bagian HAZ terdiri dari fasa *sementit*, *ferrite*, dan *perlite*. Pada bagian ini didominasi fasa *perlite* yang berbentuk lapisan terang gelap dan sementit yang berbentuk butiran gelap halus. Hal tersebut menunjukkan bahwa bagian HAZ memiliki kekerasan yang tinggi [13]. Pada bagian *base metal* terlihat ada dua fasa yaitu *ferrite* dan *perlite*. Hal ini selaras dengan [5] yang menyatakan pada daerah *base metal* fasa *ferrite* terlihat lebih dominan, fasa ini merupakan struktur asli dari material dan belum terpengaruh panas dari pengelasan.

c. Kuat arus 275 A



Gambar 14. Struktur Mikro kuat arus 275 A (a) fasa *weld metal*, (b) fasa HAZ, (c) fasa

base metal

Pada gambar 14a, 14b, dan 14c struktur mikro kuat arus 275 A terdapat fasa ferrite, perlite, dan sementit. Pada bagian weld metal dengan kuat arus 275 A didominasi oleh fasa perlite dan sementit. Pada daerah HAZ terdapat 3 fasa yaitu *perlite*, *sementit* dan *bainit*. Fasa yang terdapat pada HAZ menyebabkan bagian tersebut kuat dan keras. Penyebabnya yaitu karena proses pendinginan pada HAZ yang cepat. Pada daerah *base metal* didominasi oleh dua fasa yaitu *ferrite* dan *perlite*. Kedua fasa tersebut terlihat merata di bagian *base metal* sehingga menyebabkan material memiliki sifat yang kuat dan ulet.

Pada dasarnya struktur mikro yang terbentuk dari *laser welding* dengan variasi kuat arus dari yang terkecil 225 A, 250 A, dan 275 A akan menunjukkan perubahan. Contohnya pada bagian *weld metal* dan HAZ dengan kuat arus 275 A menunjukkan fasa sementit yang lebih dominan dari pada kuat arus 250 A dan 225 A. Penyebabnya yaitu karena ada proses laser welding memiliki karakteristik intensitas energi panas yang tinggi pada area yang kecil dan waktu yang singkat. Hal tersebut menyebabkan daerah las menjadi sangat panas dan terpusat pada *center weld metal*, sehingga pendinginan sangat cepat terjadi pada bagian tersebut [12]. *Heat input* yang besar menyebabkan daerah yang terpengaruh panas juga luas, sebaliknya *heat input* yang kecil daerah yang terpengaruh panas juga kecil [14]. Selain itu pada kuat arus 225 A butir struktur mikro terlihat kecil dan jarak butirannya terlihat lebih rapat. Pada kuat arus 250 A butir struktur mikro semakin besar dan renggang. Sedangkan pada kuat arus 275 A butir struktur mikronya lebih besar dan renggang dari pada kuat arus 250 A dan 225 A. Hal ini selaras dengan penelitian dari [15], yang menyatakan bahwa semakin besar kuat arus maka panas yang diterima butiran semakin tinggi, sehingga struktur butir pada daerah logam mengembang lebih besar dan jarak butir semakin renggang.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian korelasi kuat arus *laser welding* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada baja NAK 80, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa variasi kuat arus laser welding berpengaruh terhadap hasil kekerasan vickers pada baja NAK 80. Dari hasil uji kekerasan vickers terdapat perbedaan nilai kekerasan pada daerah weld metal, HAZ, dan base metal. Pada kuat arus 275 A diperoleh nilai daerah base metal sebesar 399,8288 VHN, weld metal 485,5191 VHN, daerah HAZ 521,4778 VHN. Pada kuat arus 250 A diperoleh kekerasan daerah base metal sebesar 392,0443 VHN, daerah weld metal 478,6415 VHN, dan daerah HAZ 510,111 VHN. Pada kuat arus 225 A, meliputi daerah base metal 382,9029 VHN, daerah weld metal 457,295 VHN, dan pada daerah HAZ 502,5802 VHN. Nilai kekerasan pada setiap variasi kuat arus mengalami peningkatan yang cukup tinggi dibandingkan dengan kekerasan bahan dasar, hal tersebut terjadi karena heat input dan pesebaran panas yang berbeda. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar kuat arus akan meningkatkan kekuatan kekerasan. Variasi kuat arus pada laser welding berpengaruh terhadap hasil struktur mikro pada baja NAK 80 dengan variasi kuat arus 225 A, 250 A, dan 275 A. Perubahan struktur mikro yang signifikan terjadi pada kuat arus 275 A di daerah HAZ yaitu dengan munculnya fasa sementit dan bainit, sedangkan semakin turun kuat arus fasa didominasi sementit dan perlit. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada spesimen dengan kuat arus 275 A memiliki sifat yang kuat dan keras dari pada spesimen dengan kuat arus dibawahnya. Penyebabnya yaitu karena ada proses laser welding memiliki karakteristik intensitas energi panas yang tinggi pada area yang kecil dan waktu yang singkat. Hal tersebut menyebabkan daerah las menjadi sangat panas dan terpusat pada center weld metal, sehingga pendinginan sangat cepat terjadi pada bagian tersebut. Semakin jauh jarak dari center weld metal pendinginan akan semakin menurun. Heat input yang besar laser welding menyebabkan daerah yang terpengaruh panas juga luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Indriani et al., "Analisis Pengaruh Variasi Laser Power dan Wobble Frequency Proses Laser Welding Pada Material SUS 304 Terhadap Struktur Mikro dan Nilai," 2023.
- [2] M. I. Azkiya, "Pengaruh Tegangan dan Pulse Pada Sambungan Las Laser Baja Perkakas NAK80," 2018.
- [3] B. D. Siswanto, C. Y. Nainggolan, and K. Indonesia, "Pengaruh Variasi Arus Listrik terhadap Struktur Kristal dan Sifat Mekanik pada Baja Karbon Sedang dengan Las Laser untuk Perbaikan Mold The Effects of Electric Current Variation on Crystal Structure and Mechanical Properties and on Medium Carbon Steel wit," vol. 7, no. 1, pp. 64-78, 2023.
- [4] R. Rosidi, "Repair Mould Baja AISI 420 dengan Metoda Laser Beam Welding," Pros. Semin. Nas. Tek. Mesin Politek. Negeri Jakarta, pp. 1644-1650, 2022.
- [5] A. Prayogo, M. Munir, and Mukhlis, "Analisis Pengaruh Variasi Frekuensi Laser dan Daya (Power) Laser Pada Pengelasan Laser Beam Welding (LBW) Jenis Fiber Laser dengan Material Stainless Steel DIN 1 . 4003 Terhadap Sifat Mekanik," pp. 1-5, 2023.
- [6] Daido Steel Co., "Annual Book Daido steel Standard, Specification NAK80, Tokyo Japan," vol. 3, 2012.
- [7] C. Hanafi, "Analisa Kekuatan Las Laser pada Reparasi Cetakan Plastik," 2019.
- [8] S. Sarjiyana, Lisa Agustriyana, "Analisis Sifat Mekanik Pengelasan Bimetal Plat Baja Karbon Rendah Dan Stainless Steel Dengan Las Gtaw," J. Tek. Ilmu dan Apl., vol. 09, no. 2, pp. 12-16, 2020.
- [9] J. Greebmalai, K. Matsumoto, K. Marumoto, and M. Yamamoto, "Effect of Hardness Distribution on Strength of Narrow-Gap Hot-Wire Laser-Welded Joint for High-Tensile Strength Steel," Materials, vol. 18, no. 2, art. 297, 2025.
- [10] R. Riswanda, Akhyar, H. Kadir, Sugianto, and A. D. Saragih, "The Effect of Heat Input on Tensile Strength, Vickers Hardness, and Microstructure on DMW of AISI 1015 and 304L SS through the GMAW Process," J. Achiev. Mater. Manuf. Eng., vol. 123, no. 1, pp. 5-16, 2024.
- [11] D. Nainggolan, P. Manik, and A. W. B. Santosa, "Pengaruh Kuat Arus Listrik Dan Kecepatan Pengelasan SAW terhadap Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro pada Sambungan Baja SS 400," J. Tek. Perkapalan, vol. 12, no. 4, 2024.
- [12] M. A. Reynaldy, R. Kartikasari, and A. B. Prasetyo, "Pengaruh temperatur proses austemper besi tuang paduan Al (2,17%) terhadap struktur mikro, kekerasan, dan keausan," Cendekia Mekanika, vol. 4, no. 2, pp. 175-184, 2023.
- [13] J. Pue Wea, R. Kartikasari, and A. B. Prasetyo, "Pengaruh Waktu Proses Dct Pada Baja Mangan Dengan Penambahan 17,4 Cr Dan 18,4 Cr Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan Dan Keausan". Cendekia Mekanika. Vol. 4, no. 2, pp. 166-174, 2023.
- [14] F. Arifin, Wartono, and A. B. Prasetyo, "Studi Analisis Heat Input Terhadap Kekuatan Lengkung (Bending) dan Kekuatan Tarik Sambungan Activated-Tig (A-Tig) Pada Baja Karbon Rendah". Cendekia Mekanika, Vol. 5 no. 1, pp. 54-61, 2025.
- [15] R. Bintarto, T. D. Widodo, R. Raharjo, M. S. Ma'arif, F. G. U. Dewi, and G. D. Pratama, "Analisa Struktur Mikro dan Kekuatan Bending Sambungan Las TIG dengan Perbedaan Kuat Arus Listrik pada Logam Tak Sejenis Aluminium Paduan 5052-Baja Galvanis dengan Filler Al-Si 4043," J. Rekayasa Mesin, vol. 11, no. 1, pp. 125-131, 2020.