

ANALISIS PENGARUH VARIASI *LASER POWER* DAN *WOBBLE FREQUENCY* PROSES *LASER WELDING* PADA MATERIAL SUS 304 TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN NILAI KEKERASAN

Sri Indriani^{1*}, M. Miftachul Munir^{2*}, Hendri Budi Kurniyanto^{3*}

Program Studi Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya^{1*2*3*}

Email: sriindriani.professional@gmail.com^{1*}; m.munir@ppns.ac.id^{2*}; budi.hb97@gmail.com^{3*};

Abstract – Welding is a major process in fabrication industry of transportation. So, that required efficiency and good welding results. This study used laser welding process with 1 mm thickness austenitic SUS 304 material. Crucial parameters in laser welding are power and wobble frequency, because they can affect material's mechanical properties. This research was conducted to determine the effect of varying power and wobble frequency values of SUS 304 material on the microstructure and hardness values. The power used was 33% and 38% varied with wobble frequencies 10 Hz and 12 Hz. The specimen testing are visual inspection, macro structure test, micro structure test, SEM, and hardness test. The results of macro structure test show that the greater power and wobble frequency values, the deeper penetration. Micro-test results on the material show that the formation of lathy ferrite occurs in areas with a high cooling rate, while skeletal ferrite is formed in areas with a low cooling rate. The highest hardness value in weld metal area is at variation 38% power and 12 Hz wobble frequency, which is 197.23 HV. SEM testing showed no micro size defects and finer grain structures. It shows that the greater the value of power and wobble frequency, the deformation occurs and the results of the welding are increasingly concave.

Keywords: laser welding, power, wobble frequency, SUS 304, SEM.

1. PENDAHULUAN

Laser welding adalah metode penyambungan material dengan memanfaatkan sinar radiasi yang ditransmisikan kepada material. Cahaya yang berada di material diserap dan diubah menjadi panas. Panas yang dihasilkan ini menyebabkan material meleleh dan dapat menyatu [1]. Jenis laser welding yang biasa digunakan dalam industri adalah fiber laser. Fiber laser merupakan jenis pengelasan yang memiliki pemanasan dan pendinginan yang cepat, distorsi yang rendah, dan akurasi yang tinggi [2].

Parameter laser welding yang berpengaruh pada hasil pengelasan adalah power dan wobble frequency. Laser power merupakan parameter yang mempengaruhi masukan panas pada material. Semakin besar power yang digunakan, maka panas yang diterima oleh material akan semakin besar [3]. Wobble frequency terdiri dari dua kata yaitu, wobble dan frequency. Secara garis besar, frekuensi adalah jumlah gelombang yang dapat dihasilkan dalam satu detik. Selanjutnya, wobble merupakan perpindahan gerakan dari satu sisi ke sisi yang lain. Jadi, wobble frequency merupakan parameter yang mengatur jumlah wobble yang diciptakan dalam satu detik. Parameter tersebut dapat mempengaruhi kedalaman penetrasi las sehingga

memberikan pengaruh terhadap mikrostruktur pengelasan yang dihasilkan [4]. Pemanfaatan variasi dari keduanya dapat menghasilkan distribusi panas yang baik. Efek dari distribusi panas yang baik adalah sifat mekanik yang baik dan dapat menghasilkan Penetrasi yang maksimal [5]. Oleh karena itu, akan dilakukan Analisis Pengaruh Variasi Laser Power dan Wobble Frequency Proses Laser Welding pada material SUS 304 terhadap Struktur Mikro dan Nilai Kekerasan.

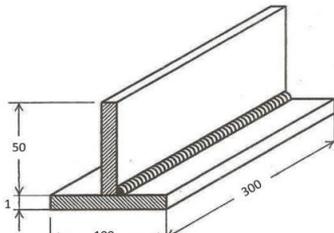
2. METODOLOGI .

2.1 Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan proses laser welding pada material SUS 304 dengan ketebalan 1 mm. Variasi yang digunakan adalah power 33% dan wobble frequency 10 Hz, power 33% dan wobble frequency 12 Hz, power 38% dan wobble frequency 10 Hz, serta power 38% dan wobble frequency 12 Hz. Pengujian material yang dilakukan adalah Inspeksi visual, pengujian struktur makro, pengujian struktur mikro, scanning electron microscope (SEM), dan micro hardness.

2.2 Persiapan Pengelasan dan Spesimen Uji

Peneliti menyiapkan material untuk pembuatan spesimen uji. Material yang digunakan adalah SUS 304 dengan ukuran 50x300 sejumlah 4 buah dan ukuran 100x300 sejumlah 4 buah sesuai dengan ISO 15614-11. Kemudian dilakukan pengelasan T-joint pada material tersebut sesuai yang ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 1. Joint design

Selanjutnya menyiapkan peralatan yang dibutuhkan untuk pengelasan meliputi mesin laser welding dan kelengkapannya, shielding gas Ar 97,5% dan CO₂ 2,5%, dan filler metal ER308L. Dilakukan record parameter aktual pada saat proses pengelasan sebagai berikut.

Tabel 1. Record Parameter Pengelasan

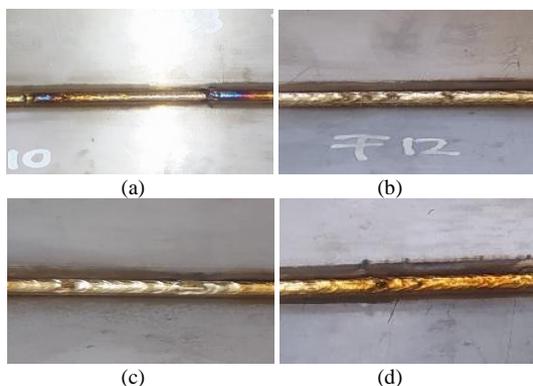
Variasi	Time (s)	Travel Speed (mm/s)	Daya Laser (Watt)	Heat Input (J/mm)
1	16,46	18,23	495	27,15
2	16,39	18,30	495	27,05
3	16,24	18,47	570	30,8
4	15,7	19,11	570	29,83

Setelah proses pengelasan selesai dilaksanakan, kemudian dilaksanakan pengujian. Pengujian yang dilaksanakan dalam penelitian ini adalah inspeksi visual, pengujian struktur makro, pengujian struktur mikro, SEM, dan micro hardness.

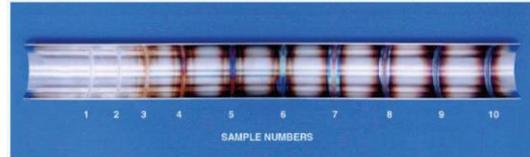
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Inspeksi Visual

Adapun cacat las dari hasil inspeksi visual dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. Daerah Cacat (a) Variasi 1, (b) Variasi 2, (c) Variasi 3, (d) Variasi 4

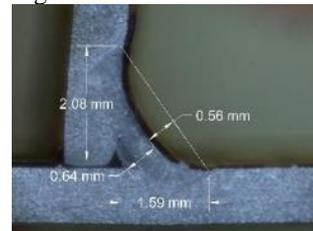


Gambar 3. Sampel Excessive Discoloration (AWS D18.1, 2009)

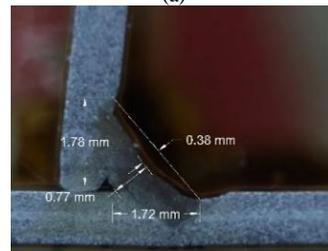
Berdasarkan acceptance criteria EN 1011-6, hasil inspeksi visual pada seluruh spesimen ditemukan cacat las yaitu underfill yang dapat dilihat pada bagian bertanda merah Gambar 2. Selain itu, apabila merujuk acceptance criteria pada AWS D18.1, ditemukan adanya indikasi kelebihan perubahan warna (excessive discoloration). Untuk acuan excessive discoloration mengacu pada sampel yang terdapat di AWS D18.1 yang dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan hasil inspeksi visual, perubahan warna tersebut masih masuk ke dalam acceptance criteria karena sesuai dengan sample excessive discoloration nomor 3 pada Gambar 3.

3.2 Hasil Pengujian Struktur Makro

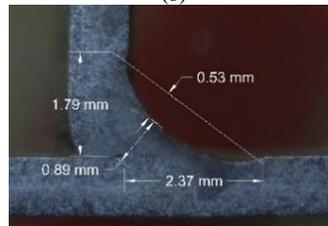
Pengujian tersebut dilakukan untuk mengetahui hasil dari proses pengelasan laser welding dengan variasi nilai power dan wobble frequency. Hasil pengujian makro tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.



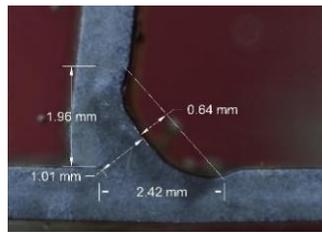
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2. Hasil Pengujian Struktur Makro (a) Variasi 1, (b) Variasi 2, (c) Variasi 3, (d) Variasi 4

Terdapat cacat pengelasan berupa deformasi dan penetrasi yang tidak sempurna (*lack of penetration*). Deformasi terjadi pada variasi 2 dan variasi 4. *Lack of penetration* terjadi pada variasi 1 dan variasi 2, sedangkan pada variasi 3 dan variasi 4 terjadi penetrasi yang sempurna. Kedalaman penetrasi tersebut berbanding lurus dengan besarnya nilai *power* dan *wobble frequency*. Semakin besar nilai *power*, maka panas yang diterima material akan semakin besar [6]. Kemudian, semakin besar nilai *wobble frequency* maka penetrasi yang dihasilkan semakin dalam, sehingga hasil pengelasan akan semakin cekung [7].

Namun, apabila nilai *power* besar dikombinasikan dengan nilai *wobble frequency* yang besar dapat menghasilkan pengelasan yang cekung dan terjadi deformasi. Untuk menghindari hal tersebut, maka dapat digunakan kombinasi nilai *power* besar dengan nilai *wobble frequency* kecil seperti variasi 3 agar mendapatkan hasil pengelasan yang maksimal.

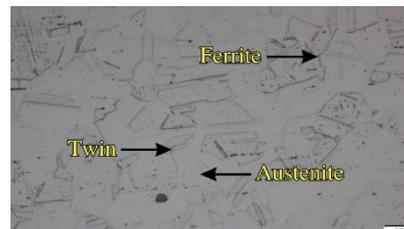
3.3 Hasil Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk melihat perubahan struktur mikro pada material SUS 304 akibat proses pengelasan dengan variasi yang berbeda pada setiap spesimen. Dilakukan pengujian struktur mikro dengan perbesaran 500X. Hasil pengujian tersebut dapat dilihat pada Gambar 6 hingga Gambar 8 berikut.

Pada bagian *base metal* yang merupakan material *stainless steel*, unsur *nickel* akan membentuk *austenitic form* (warna putih), sedangkan *chromium* akan membentuk *ferritic form* (warna hitam). Selain itu ditemukan *twin form* (garis kembar yang sejajar) yang merupakan ciri khas *stainless steel*. Tidak terdapat perbedaan struktur mikro pada *base metal* seluruh variasi karena *base metal* mendapatkan perlakuan yang sama.

Proses *laser welding* memiliki karakteristik intensitas energi panas yang sangat tinggi pada area yang kecil dalam waktu yang singkat. Hal tersebut menyebabkan daerah las menjadi sangat panas dan terpusat pada daerah *center weld metal*, sehingga pendinginan sangat cepat terjadi pada bagian tersebut. Semakin jauh jarak dari *center weld metal*, maka laju pendinginan akan semakin menurun. Selain itu, adanya perbedaan ukuran

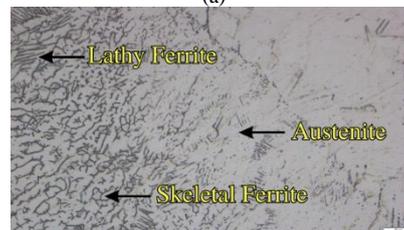
dan temperature yang besar antara *weld metal* dan bagian *base metal* juga mengakibatkan laju pendinginan pada *weld metal* sangat tinggi [8].



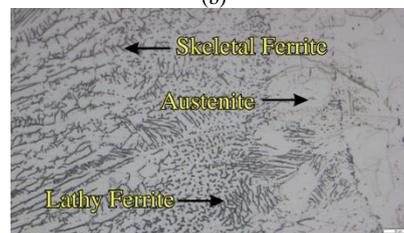
Gambar 3. Hasil Pengujian Struktur Mikro Perbesaran 500X pada *Base Metal*



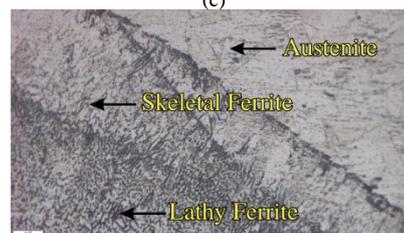
(a)



(b)

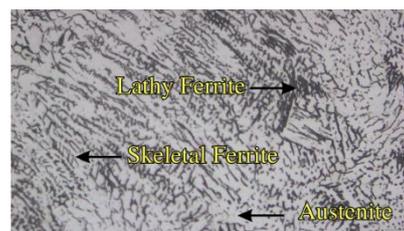


(c)

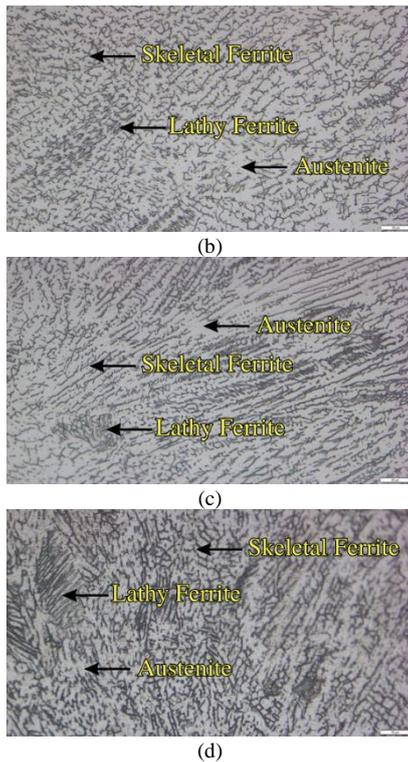


(d)

Gambar 4. Hasil Pengujian Struktur Mikro Perbesaran 500X pada HAZ (a) Variasi 1, (b) Variasi 2, (c) Variasi 3, (d) Variasi 4



(a)



Gambar 5. Hasil Pengujian Mikro Perbesaran 500X pada Weld Metal (a) Variasi 1, (b) Variasi 2, (c) Variasi 3, (d) Variasi 4

HAZ terletak di antara weld metal dan base metal sehingga memiliki cooling rates tinggi (cepat), sedangkan weld metal memiliki cooling rates sangat tinggi (sangat cepat). Pada daerah HAZ yang menerima heat input rendah dan cooling rate tinggi seperti variasi 1 dan variasi 2, memiliki struktur lathy ferrite yang mendominasi. Sedangkan, daerah dengan heat input tinggi dan cooling rate yang lebih rendah seperti variasi 3 dan variasi 4 memiliki skeletal ferrite yang mendominasi.

Weld metal merupakan daerah yang mendapatkan heat input tertinggi dibandingkan dengan daerah lain, akibatnya memiliki cooling rates yang sangat tinggi pula. Proses pematatan weld metal pada seluruh variasi diklasifikasikan sebagai solidification type FA. Pada solidification FA, terjadi pematatan ferrite primer dan reaksi 3 fasa (austenite, ferrite, dan liquid) [9]. Pada weld metal dengan heat input lebih rendah dan cooling rate tinggi seperti variasi 1 dan variasi 2, memiliki struktur skeletal ferrite yang mendominasi. Sedangkan, pada weld metal yang memiliki heat input dan cooling rate sangat tinggi seperti variasi 3 dan variasi 4, memiliki struktur lathy ferrite yang mendominasi.

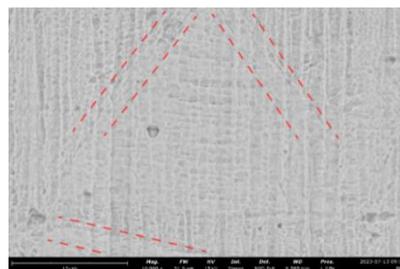
3.4 Hasil Pengujian SEM

Scanning Electron Microscope (SEM) dilakukan untuk melihat struktur morfologi permukaan material menggunakan mikroskop electron dengan perbesaran 10.000X. Hasil

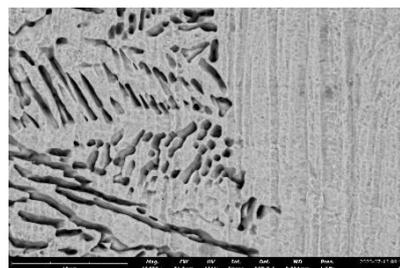
pengujian SEM dapat dilihat pada Gambar 9 hingga Gambar 11.

Berdasarkan hasil pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) pada bagian base metal, dapat dilihat dengan jelas struktur fasa yang terjadi yaitu austenite (warna putih), ferrite (warna abu-abu), dan twin (garis kembar yang sejajar). Pada bagian HAZ, terlihat dengan jelas ferrite yang berubah bentuk menjadi lathy ferrite dan skeletal ferrite akibat perbedaan laju pendinginan. Hasil SEM pada daerah weld metal pada variasi 1 dan variasi 2, weld metal didominasi oleh skeletal ferrite (hitam) yang tersebar pada matriks austenite (putih). Sedangkan pada variasi 3 dan variasi 4, weld metal didominasi oleh lathy ferrite yang tersebar pada matriks austenite, hanya saja susunan strukturnya lebih rapat pada variasi 4.

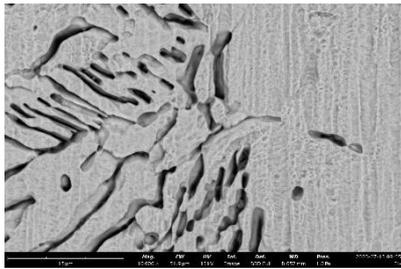
Perbedaan bentuk ferrite tersebut diakibatkan oleh perbedaan laju pendinginan yang terjadi. Transformasi dari ferrite menjadi austenite pada daerah pengelasan menjadi tidak sempurna karena proses pendinginan yang cepat. Hal tersebut mengakibatkan ferrite yang mempunyai lapisan tipis akan berubah menjadi austenite, sedangkan ferrite yang memiliki lapisan tebal akan berubah menjadi skeletal ferrite. Sedangkan, gradien thermal yang lebih tinggi atau pendinginan super cepat (apabila dibandingkan dengan pembentukan skeletal ferrite) mengganggu kestabilan material saat membentuk fasa ferrite-austenite, sehingga menyebabkan pembentukan lathy ferrite diikuti dengan skeletal ferrite [9]. Pendinginan sangat cepat tersebut dapat memicu terjadinya crack micro, namun defect tersebut tidak ditemukan pada seluruh variasi.



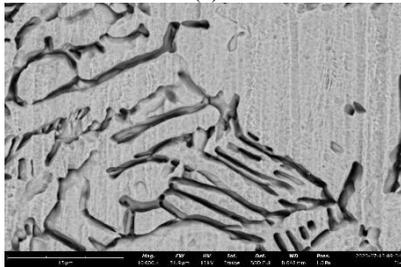
Gambar 6. Hasil Pengujian SEM pada Base Metal



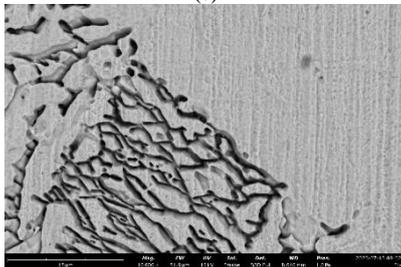
(a)



(b)

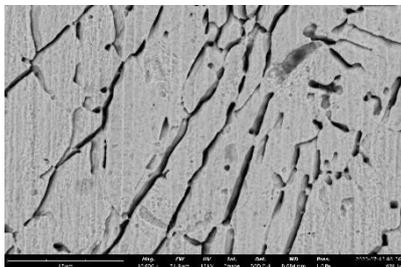


(c)

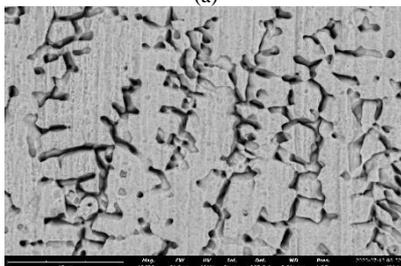


(d)

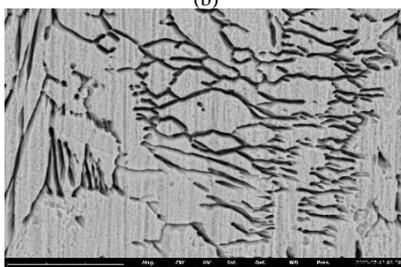
Gambar 7. Hasil Pengujian SEM pada HAZ (a) Variasi 1, (b) Variasi 2, (c) Variasi 3, (d) Variasi 4



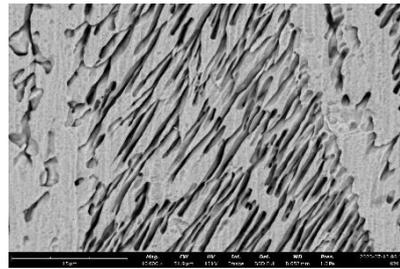
(a)



(b)



(c)



(d)

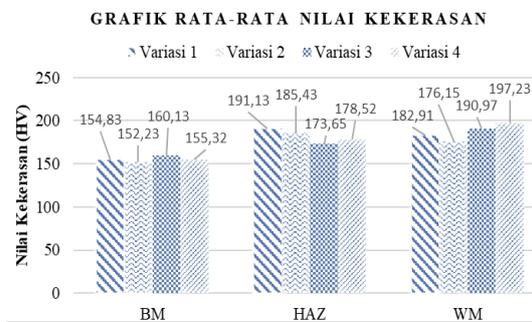
Gambar 8. Hasil Pengujian SEM pada Weld Metal (a) Variasi 1, (b) Variasi 2, (c) Variasi 3, (d) Variasi 4

3.5 Hasil Pengujian Micro Hardness

Pengujian *micro hardness* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk memperoleh nilai kekerasan. Pengujian ini menggunakan indentor berupa vickers dengan pembebanan sebesar 500 gf. Pengujian dilakukan pada 18 titik identasi. Kemudian, didapatkan rata-rata nilai kekerasan pada Gambar 12.

Heat input dan *cooling rate* yang terjadi pada bagian *HAZ* dan *weld metal* memberikan pengaruh terhadap perubahan struktur mikro yang kemudian menyebabkan perbedaan nilai kekerasan. Pada daerah *HAZ* yang menerima *heat input* lebih rendah, seperti variasi 1 dan variasi 2 memiliki *cooling rate* yang hampir sama tingginya dengan *weld metal*, sehingga memiliki struktur *lathy ferrite* yang halus dan mendominasi. Sedangkan, daerah dengan *heat input* tinggi dan *cooling rate HAZ* yang lebih rendah dibandingkan *weld metal* seperti variasi 3 dan variasi 4 memiliki *skeletal ferrite* yang mendominasi.

Pada daerah *weld metal*, perbedaan bentuk *ferrite* juga dipengaruhi oleh *heat input* dan *cooling rate* (laju pendinginan) yang terjadi. Pada *weld metal* dengan *heat input* lebih rendah dan *cooling rate* tinggi seperti variasi 1 dan variasi 2, memiliki struktur *skeletal ferrite* yang mendominasi. Sedangkan, pada *weld metal* yang memiliki *heat input* dan *cooling rate* sangat tinggi seperti variasi 3 dan variasi 4, memiliki struktur *lathy ferrite* yang mendominasi.



Gambar 12. Grafik Rata-Rata Nilai Kekerasan

Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa nilai kekerasan terbesar pada daerah *HAZ* dimiliki oleh variasi 1 yaitu sebesar 185,43 kg/mm².

Sedangkan, nilai kekerasan terbesar pada daerah *weld metal* dimiliki oleh variasi 4 yaitu sebesar 197,23 kg/mm².

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian spesimen dan analisis data dalam penelitian ini, dapat diambil kesimpulan antara lain:

1. Berdasarkan hasil inspeksi visual, penambahan nilai *power* dapat meningkatkan *heat input*. Hal tersebut dibuktikan dengan perubahan warna yang terjadi pada *face weld*. Semakin besar nilai *power*, maka warna las yang dihasilkan akan semakin gelap.
2. Berdasarkan hasil pengujian makro, didapatkan bentuk penetrasi yang cekung (*concave*) pada seluruh variasi. Kedalaman penetrasi tersebut berbanding lurus dengan besarnya nilai *power* dan *wobble frequency*. Semakin besar nilai *power*, maka panas yang diterima material akan semakin besar. Kemudian, semakin besar nilai *wobble frequency* maka penetrasi yang dihasilkan semakin dalam. Namun, apabila nilai *power* dan *wobble frequency* yang besar dikombinasikan, akan didapatkan hasil pengelasan yang terlalu cekung dan deformasi pada material.
3. Hasil pengujian mikro bagian *base metal* tersusun atas *austenite* dan *ferrite*. Pada bagian *weld metal* variasi 1 dan variasi 2 memiliki struktur *skeletal ferrite* yang mendominasi, sedangkan variasi 3 dan variasi 4 memiliki struktur *lathy ferrite* yang mendominasi. Pada daerah HAZ variasi 1 dan variasi 2 memiliki struktur *lathy ferrite* yang mendominasi, sedangkan variasi 3 dan variasi 4 memiliki *skeletal ferrite* yang mendominasi.
4. Hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan tidak terdapat defect berukuran mikro pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal*. Selain itu, didapatkan bentuk struktur yang lebih jelas. Pada daerah *weld metal* variasi 3 dan variasi 4 memiliki tekstur yang halus dan rapat dengan ukuran butir yang kecil. Sedangkan pada daerah HAZ variasi 1 dan variasi 2 memiliki tekstur yang halus dan rapat dengan ukuran butir yang kecil.
5. Nilai kekerasan berbanding lurus dengan laju pendinginan. Semakin tinggi laju pendinginan, maka nilai kekerasan akan semakin besar. Nilai kekerasan terbesar pada daerah HAZ dimiliki oleh variasi 1 yaitu sebesar 185,43 kg/mm². Sedangkan, nilai kekerasan terbesar pada daerah *weld metal* dimiliki oleh variasi 4 yaitu sebesar 197,23 kg/mm².

5. PUSTAKA

- [1] Gonçalves, L. F., Duarte, F. M., Martins, C. I., & Paiva, M. C. (2021). *Laser welding of thermoplastics: An overview on lasers, materials, processes and quality*. *Infrared Physics & Technology*, 119, 103931.
- [2] Chowdhury, S., Nirsanametla, Y., Muralidhar, M., Bag, S., Paul, C. P., & Bindra, K. S. (2020). Identification of modes of welding using parametric studies during ytterbium fiber laser welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 748-761.
- [3] Zhang, J., Hu, K., Zhao, J., Duan, S., & Zhan, X. (2022). Effect of heat input on microstructure and corrosion resistance in heat affected zone of 304 stainless steel joint by laser welding. *Materials Today Communications*, 30, 103054.
- [4] Meylan, Bastian., et. al., *Laser Welding Control of Microstructure with Wobble Technique*. *Laser Manufacturing Conference*. 2019. Switzerland.
- [5] Farrokhi, F., Endelt, B., & Kristiansen, M. (2019). A numerical model for full and partial penetration hybrid laser welding of thick-section steels. *Optics & Laser Technology*, 111, 671-686.
- [6] Katayama, S. (2013). *Introduction: Fundamentals of Laser Welding*. In *Handbook of Laser Welding Technologies* (pp. 3-16). Woodhead Publishing.
- [7] Das, Abhishek., et, al. (2020). *Feasibility of Fillet Edge Weld using Laser Wobble Technique*. 20th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining. University of Warwick, United Kingdom.
- [8] Kumar, Suresh K. (2014). *Analytical Modeling of Temperature Distribution, Peak Temperature, Cooling Rate and Thermal Cycles in a Solid Work Piece Welded by Laser Welding Process*. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014).
- [9] Saha, Saptarshi. Mukherjee, Manidipto. Pal, Tapan. (2014). *Microstructure, Texture, and Mechanical Property Analysis of Gas Metal Arc Welded AISI 304 Austenitic Stainless Steel*. *Journal of Material Engineering and Performance*. Vol.24, No.3, pp.2015-1125