

Analisis Pengaruh Variasi *Heat Input* Pengelasan FCAW pada Sambungan Baja BKI *Grade A* Terhadap Sifat Mekanik

M. Ichsan Rosidin Yuniarto, Herman Pratikno, dan Dirta Marina Chamelia
Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: rosidinyuniarto@gmail.com

Abstrak—Kegiatan eksplorasi minyak dan gas di laut membutuhkan fasilitas anjungan lepas pantai khususnya berupa struktur terapung, karena dapat berpindah tempat sesuai kebutuhan. Salah satu rangkaian pekerjaan untuk memproduksi struktur lepas pantai tersebut adalah proses pengelasan. *Flux Cored Arc Welding* (FCAW) merupakan proses pengelasan yang cocok untuk kegiatan fabrikasi karena memiliki tingkat produktivitas yang tinggi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi *heat input* terhadap kekuatan tarik dan pengamatan struktur makro-mikro pada pengelasan baja BKI *Grade A* dengan metode pengelasan FCAW. Variasi *heat input* yang digunakan pada penelitian ini adalah 1,19 KJ/mm, 1,32 KJ/mm, dan 1,46 KJ/mm. Pada hasil pengujian tarik, pengelasan dengan *heat input* 1,46 KJ/mm memiliki nilai kekuatan tarik terbesar, *ultimate strength* 453,85 MPa dan *yield strength* 349,76 MPa. Lebar daerah HAZ tiap spesimen tidak jauh berbeda, adapun pengelasan dengan *heat input* 1,46 KJ/mm memiliki daerah HAZ terlebar yaitu 18 mm. Sedangkan pada hasil pengamatan struktur mikro, pengelasan dengan menggunakan *heat input* 1,46 KJ/mm pada bagian *weld metal* memiliki presentase struktur *ferrite* paling kecil yaitu 61,1%, kemudian struktur *pearlite* 38,9%.

Kata kunci—*Flux Cored Arc Welding*, Baja BKI *Grade A*, *Heat Input*, Kekuatan Tarik, Struktur Makro-Mikro

I. PENDAHULUAN

SEBUAH negara harus bisa memanfaatkan sumber daya yang ada agar bisa bertahan di tengah persaingan global. Sektor kemaritiman menjadi tolok ukur keberhasilan negara maritim seperti Indonesia. Pembangunan dan pertumbuhan ekonomi harus difokuskan ke bidang industri maritim agar negara ini bisa maju dan berkembang sebagai negara maritim. Selain bidang perikanan ada juga bidang *oil and gas*, industri minyak dan gas tidak lepas dari anjungan lepas pantai yang dapat berupa struktur terpancang (*fixed*) maupun struktur terapung (*floating*).

Pengelasan adalah tahap inti dari rangkaian proses fabrikasi. Berdasarkan definisi dari Deutche Industrie Normen (DIN) las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Pengelasan merupakan proses

menggabungkan dua potongan baja bersama-sama dengan memanaskannya ke titik dimana material pengisi (*filler*) melebur dengan logam dasar dan menjadi satu bagian yang tersambung [1]. Menurut [2], pengelasan bukan tujuan utama dari konstruksi, tetapi hanya merupakan sarana untuk mencapai ekonomi pembuatan yang lebih baik.

Pengelasan dapat dilakukan dengan berbagai macam metode, yaitu SMAW (*Shield Metal Arc Welding*), GTAW (*Gas Metal Arc Welding*), GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), dan metode-metode lainnya. Proses pengelasan FCAW memiliki beberapa keuntungan yaitu tingkat deposisi yang tinggi, lebih sederhana dari SAW, tidak membutuhkan skill operator yang tinggi seperti GMAW, produktivitas lebih tinggi dari SMAW, dan wujud permukaan yang bagus [3].

Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi kualitas hasil las adalah *heat input*. Parameter yang paling berpengaruh pada kedalaman penetrasi las adalah arus. Menurut [4], dalam penelitiannya telah menunjukkan melalui grafik bahwa semakin tinggi arus maka tingkat penetrasi juga semakin tinggi, sebaliknya jika arus diturunkan maka tingkat penetrasi juga semakin menurun. Dapat disimpulkan bahwa dengan meningkatnya arus pengelasan, maka dapat meningkatkan penetrasi las, sedangkan dengan menurunnya arus pengelasan, maka dapat menurunkan penetrasi las [5].

Dalam penelitian ini, penulis ingin menganalisa pengaruh variasi *heat input* pada metode pengelasan FCAW dengan menggunakan material BKI *Grade A*, pengujian yang dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik yaitu kekuatan tarik yang sesuai ASME Section IX, serta bagaimana struktur makro dan mikro dari hasil pengelasan tersebut. Elektroda yang digunakan adalah AWS A5.20 E71T-1 dengan menggunakan gas pelindung tambahan CO₂. Kali ini penulis ingin melakukan penelitian dengan menggunakan material BKI *Grade A* yang memiliki komposisi kimia dan sifat mekanik yang setara dengan baja ASTM A131 grade A. BKI *Grade A* merupakan *ordinary strength hull structural steel* yang bisa digunakan untuk struktur lepas pantai terapung seperti FSO dan FPSO pada bagian geladak (*deck*) maupun lambung (*hull*). Oleh karena itu, nilai kekuatan tarik sangat dibutuhkan untuk menjadi acuan

perancangan strktur terapung, karena pada bagian geladak (deck) sering terjadi sagging dan hogging.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Baja Karbon

Baja karbon adalah baja yang menggunakan paduan antara besi (Fe) dan karbon (C). Selain karbon, sering juga ditambahkan unsur chrom (Cr), nikel (Ni), vanadium (V), molybdaen (Mo) untuk mendapatkan sifat lain sesuai aplikasi dilapangan [6]. Sifat baja karbon sangat tergantung pada kadar karbonnya, bila kadar karbon naik maka kekuatan dan kekerasannya juga bertambah tetapi perpanjangannya menurun [2].

Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon kurang dari 0,30%. Baja lunak (mild steel) banyak digunakan sebagai bahan konstruksi di sebagian besar industri, seperti migas, jembatan, transportasi, dan lain sebagainya, karena memiliki sifat mekanik yang sangat baik dan membutuhkan biaya yang rendah [7]. Sifat yang dimiliki baja karbon rendah yaitu mampu las (*weldability*), hal ini dipengaruhi oleh kekuatan tarik dan kepekaan terhadap retak las yang rendah.

Pada penelitian ini, material yang digunakan adalah pelat baja BKI Grade A. Baja ini merupakan baja karbon rendah dengan komposisi kimia seperti pada Tabel 1 dan sifat mekaniknya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1.

Komposisi kimia BKI grade A [8]

Komposisi Kimia (%)	
C _{max}	0.21
Si _{max}	0.50
Mn _{min}	2.5 x C
P _{max}	0.035
S _{max}	0.035

Tabel 2.

Sifat mekanik BKI grade A [8]

Properties	Nilai
Tensile Strength, MPa	400-520
Yield Strength min, MPa	235

B. Pengelasan FCAW

Flux Cored Arc Welding (FCAW) merupakan jenis pengelasan yang menggunakan proses otomatis maupun semi-otomatis yang memanfaatkan elektroda gulung (*wire roll*) untuk mencairkan logam. Kawat las atau Elektroda yang digunakan untuk pengelasan FCAW mempunyai bentuk tubular yang dipasok ke dalam daerah pengelasan secara kontinu dan terdapat material flux di dalam elektroda yang berbentuk tubular tersebut [9].

Metode pengelasan ini memiliki sejumlah keunggulan dan yang paling signifikan adalah tingkat produktifitas karena menggunakan *wire roll* maka dalam proses pengelasannya dapat dilakukan secara kontinu. Jika menggunakan proses yang sepenuhnya otomatis, FCAW

juga memiliki keunggulan biaya dibanding proses pengelasan lain pada umumnya [10].

Pada penelitian kali ini, penulis menggunakan proses pengelasan FCAW-G atau proses pengelasan FCAW dengan menggunakan tambahan gas pelindung yaitu CO₂. Gas pelindung mempunyai banyak fungsi dalam pengelasan, salah satunya adalah melindungi lelehan logam las dari udara luar yang dapat menyebabkan pembentukan cacat berupa porositas pada logam las. Debit gas pelindung yang sering digunakan adalah sekitar 15-20 liter per menit, tetapi pada kasus tertentu terkadang bisa mencapai 36 liter per menit [11]. Penelitian kali ini menggunakan debit 20 liter per menit.

C. Masukan Panas (Heat Input)

Heat input adalah perpindahan energi panas per unit satuan panjang pada proses pengelasan. Energi panas diakibatkan oleh parameter pengelasan yaitu arus, tegangan, sentuhan elektroda dengan logam induk dan kecepatan pengelasan. *Heat input* merupakan faktor penting dalam pengelasan karena dapat mempengaruhi laju pendinginan. Laju pendinginan akan berperan pada pembentukan struktur metalurgi daerah HAZ dan *weld metal* serta sifat mekanis dari sambungan [12]. Untuk menghitung heat input pada proses pengelasan dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$HI = \frac{V \times I}{Travel\ Speed} \quad (1)$$

Dimana:

HI = Masukan panas (J/mm atau J/in)

V = Tegangan busur las (Volt)

I = Arus las (Ampere)

Travel speed = Kecepatan pengelasan (mm/s atau in/s)

D. Uji Tarik

Uji Tarik merupakan pengujian dengan tujuan untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum material berupa nilai kekuatan tarik *yield strength* dan *ultimate strength* dari spesimen uji hasil pengelasan yang telah lolos uji radiografi. Pada pengujian ini juga terdapat adanya titik luluh (*yield point*), yaitu keadaan dimana logam mengalami pertambahan panjang ketika mendapat beban yang konstan. Dapat diartikan bahwa titik luluh merupakan keadaan dimana spesimen terdeformasi dengan beban minimumnya. Deformasi elastis terjadi sampai titik luluh (*yield point*) setelah itu deformasi yang terjadi merupakan deformasi plastis sampai material patah. Pengujian ini juga berguna untuk mengetahui batas elastis dan plastis dari spesimen uji. Standar yang digunakan pada pengujian ini adalah sesuai [13].

E. Uji Metalografi

Pengujian metalografi terdiri dari pengamatan struktur makro dan pengamatan struktur mikro. Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui daerah-daerah hasil pengelasan, seperti *weld metal*, HAZ (*Heat Affected Zone*),

dan logam induk. Pengamatan struktur makro dapat dilakukan dengan kamera dengan perbesaran 7x. Adapun pengamatan struktur mikro dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara struktur *ferrite* dan *pearlite* yang dapat mempengaruhi kekuatan mekanik spesimen hasil pengelasan. Sebelum dilakukan proses pengujian metalografi, spesimen uji terlebih dahulu dipoles dengan urutan amplas grit 80, 120, 200, 320, 400, 600, 800, dan 1500. Kemudian material uji dicelupkan atau bisa juga diolesi dengan cairan etsa berupa campuran HNO₃ dan alkohol. Setelah itu material siap diuji metalografi. Pengujian dilakukan sesuai dengan standar [13].

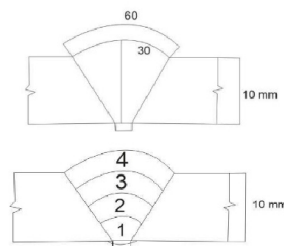
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Prosedur Pengelasan

Penelitian ini menggunakan pengelasan FCAW dengan *Welding Procedure Specification* sebagai berikut:

- Spesifikasi Material : BKI Grade A
- Dimensi : 200 mm x 150 mm x 10 mm
- Tipe Sambungan : *Butt Joint Single V-Groove*
- Sudut *Groove* : 60°
- Posisi Pengelasan : 1G
- *Filler Metal* : AWS E71T-1
- Dia. *Filler Metal* : Ø 1,2 mm
- *Shielding Gas* : CO₂
- *Flow Rate* : 20 l/min
- Polaritas Pengelasan : DCEP
- Jumlah Layer : 4 Layer

Untuk detail daerah sambungan las pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bentuk sambungan dan layer pengelasan

Setelah dilakukan pengelasan, maka spesimen hasil las akan diberi nomor tergantung dari nilai *heat input* yang digunakan pada saat proses pengelasan berlangsung. Adapun penomoran masing-masing spesimen adalah sebagai berikut:

Tabel 3.
Spesimen hasil las

Spesimen	Heat Input (KJ/mm)
1	1,19
2	1,32
3	1,46

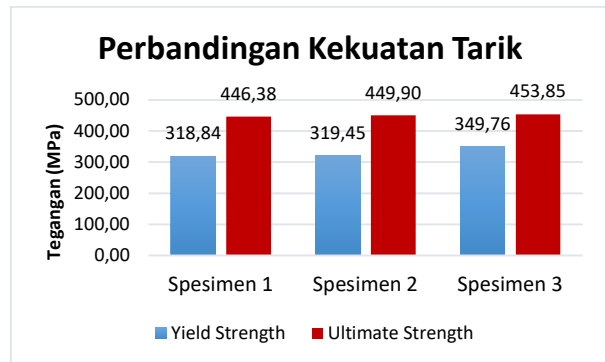
B. Pengujian Tarik

Setelah dilakukan pengujian tarik pada seluruh spesimen, maka akan diperoleh nilai kekuatan tarik berupa *yield strength* dan *ultimate strength*. Pada pengujian spesimen 1 didapatkan *yield strength* sebesar 318,84 MPa dan nilai *ultimate strength* 446,38 MPa. Untuk spesimen 2 diperoleh nilai kekuatan tarik *yield strength* sebesar 319,45 MPa dan *ultimate strength* 449,90 MPa. Pada spesimen 3 nilai kekuatan tarik yang didapatkan berupa *yield strength* sebesar 349,76 MPa dan *ultimate strength* sebesar 453,85 MPa. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4.
Hasil pengujian tarik

Spesimen	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Breaking
1	318,84	446,38	Base Metal
2	319,45	449,90	Base Metal
3	349,76	453,85	Base Metal

Syarat nilai hasil pengujian tarik dapat diterima adalah apabila nilai kekuatan tarik lebih besar dari nilai kekuatan tarik minimum pada material properties yang dimiliki logam dasar seperti pada Tabel 2, yaitu *yield strength* sebesar 235 MPa dan *ultimate strength* sebesar 400-520 MPa. Dari pengujian tarik secara keseluruhan dapat dilihat bahwa spesimen 3 yang menggunakan *heat input* 1,46 KJ/mm dalam proses pengelasannya memiliki nilai kekuatan tarik berupa *yield strength* dan *ultimate strength* tertinggi. Kemudian diikuti secara berturut-turut oleh spesimen 2 dan spesimen 1. Perbandingan nilai kekuatan tarik dapat dilihat pada Gambar 2.

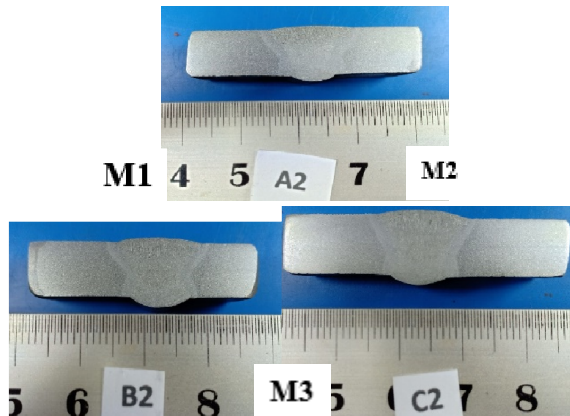


Gambar 2. Grafik perbandingan kekuatan tarik

Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai *heat input*, maka nilai kekuatan tarik akan semakin besar. Hal ini terjadi karena dengan *heat input* yang lebih besar maka tingkat peleburan elektroda dengan logam induk dan penetrasi cairan elektroda akan semakin baik dan merata, sehingga daerah penetrasi logam las (*weld metal*) semakin luas dan hasil sambungan menjadi lebih kuat.

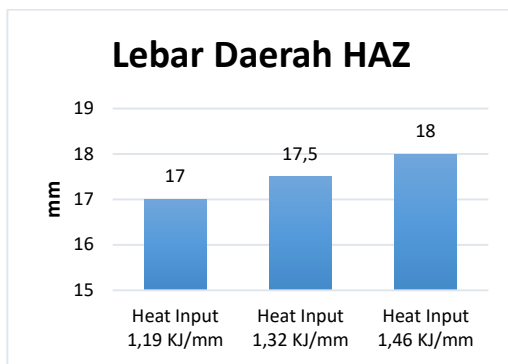
C. Pengujian Metalografi

Pengamatan struktur makro dilakukan dengan menggunakan kamera DSLR dengan perbesaran hingga 7x. Pada hasil pengamatan struktur makro, didapatkan lebar daerah HAZ yang terbentuk pada masing-masing spesimen dan tidak jauh berbeda satu sama lain, serta tidak terdapat cacat las. Spesimen 3 memiliki daerah HAZ terlebar yaitu sebesar 18 mm, kemudian diikuti spesimen 2 dengan lebar 17,5 mm, dan yang paling kecil adalah spesimen 1 dengan lebar 17 mm. Adapun lebar daerah HAZ pada masing-masing spesimen dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil pengamatan struktur makro

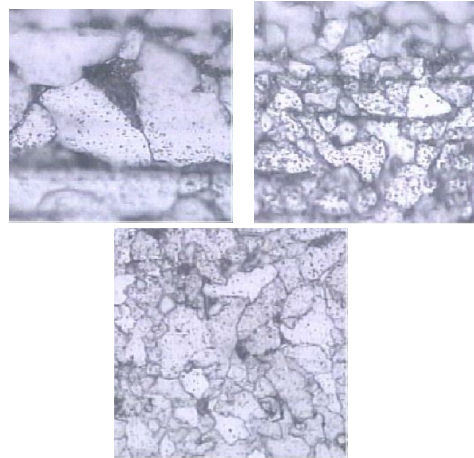
Dari pengamatan struktur makro secara keseluruhan tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa jika nilai *heat input* semakin besar maka lebar daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) yang terbentuk selama proses pengelasan akan semakin lebar. Terjadinya hal tersebut karena energi panas yang diberikan pada saat pengelasan, sehingga elektroda yang mengisi daerah *weld metal* dapat mencair dan menyebar secara merata dan daerah *weld metal* akan lebih luas. Perbandingan HAZ dapat dilihat pada Gambar 4.



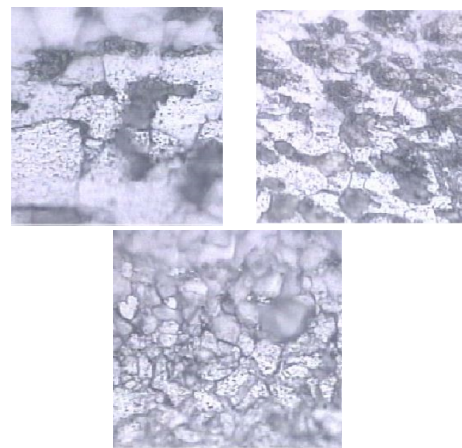
Gambar 4. Perbandingan lebar daerah HAZ

Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop dengan perbesaran 100x. Kemudian seluruh spesimen dihitung presentase kandungan *ferrite* dan *pearlite* pada masing-masing daerahnya. Struktur *ferrite* memiliki sifat lunak dan ulet yang akan membuat material mudah mengalami deformasi plastis dan patah, namun struktur *pearlite* memiliki sifat keras dan getas. Pada

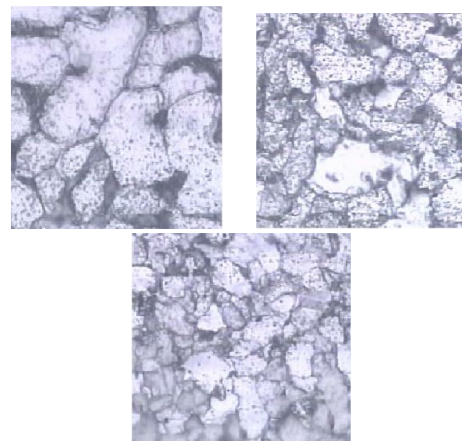
proses pendinginan logam las, struktur yang masih berupa *austenite* akan berubah menjadi *ferrite*. Karena *ferrite* sedikit melarutkan karbon, maka sisa *austenite* akan berubah menjadi *pearlite* yang mengandung banyak karbon. Hasil pengamatan struktur mikro masing-masing spesimen dapat dilihat pada Gambar 5 sampai Gambar 7.



Gambar 5. Hasil pengamatan struktur mikro spesimen 1



Gambar 6. Hasil pengamatan struktur mikro spesimen 2

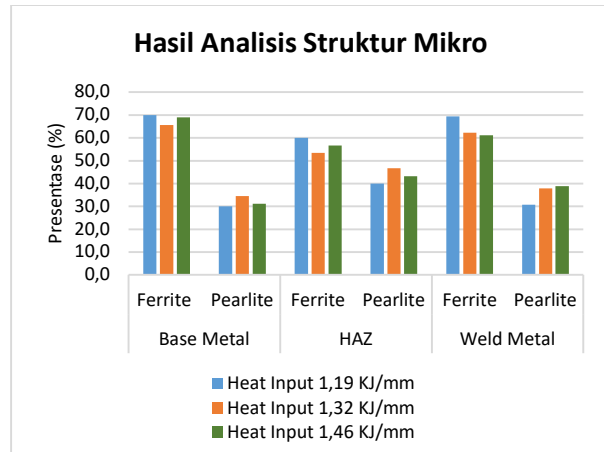


Gambar 7. Hasil pengamatan struktur mikro spesimen 3

Hasil analisis dari pengamatan struktur mikro dapat dilihat pada Tabel 5, dan perbandingan struktur *ferrite* dan *pearlite* dapat dilihat pada Gambar 8.

Tabel 5.
Hasil analisis struktur mikro

Variasi	Base Metal (%)		HAZ (%)		Weld Metal (%)	
	Ferrite	Pearlite	Ferrite	Pearlite	Ferrite	Pearlite
<i>Heat Input</i> 1,19 KJ/mm	70,0	30,0	60,0	40,0	69,3	30,7
<i>Heat Input</i> 1,32 KJ/mm	65,6	34,4	53,3	46,7	62,2	37,8
<i>Heat Input</i> 1,46 KJ/mm	68,9	31,1	56,7	43,3	61,1	38,9



Gambar 8. Perbandingan presentase ferrite dan pearlite

D. Hubungan Uji Tarik dan Struktur Makro-Mikro

Pada pengujian tarik, telah diperoleh hasil pengujian yang menunjukkan bahwa nilai *heat input* dapat mempengaruhi nilai kekuatan tarik. Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan spesimen 1 yang menggunakan *heat input* 1,19 KJ/mm yang mempunyai nilai *yield strength* dan *ultimate strength* lebih kecil daripada spesimen 3 yang menggunakan *heat input* 1,46 KJ/mm.

Hal itu terjadi karena pengaruh struktur makro maupun mikro, daerah HAZ yang terbentuk pada spesimen 1 lebih kecil daripada daerah HAZ yang dimiliki spesimen 2, dan daerah HAZ spesimen 2 lebih kecil daripada spesimen 3. Lebar daerah HAZ yang lebih panjang akan membuat material menjadi lebih kuat, karena lebar HAZ menandakan energi panas yang dialami material pada proses pengelasan. Semakin tinggi energi panas atau *heat input* yang digunakan maka tingkat peleburan elektroda pada bagian sambungan las akan semakin merata, jika *heat input* terlalu kecil maka tingkat peleburan elektroda tidak terjadi secara maksimal. Begitu pula dengan struktur mikro yang dimiliki, pada spesimen 1 di daerah *weld metal* memiliki presentase struktur *ferrite* yang lebih besar daripada spesimen 3 yang dapat berpengaruh pada kekuatan tarik spesimen tersebut. Kandungan struktur *ferrite* yang semakin banyak akan membuat spesimen menjadi lebih mudah mengalami deformasi plastis dan patah pada saat dilakukan pengujian tarik, karena struktur *ferrite* memiliki sifat lunak dan ulet.

Jadi, dari kedua pengujian tersebut dapat diketahui bahwa semakin tinggi nilai *heat input* akan memperlebar daerah HAZ pada spesimen, selain itu juga akan mengurangi presentase struktur *ferrite* pada daerah *weld metal*. Hal tersebut akan memperbesar nilai kekuatan tarik, karena daerah HAZ yang semakin lebar dan presentase *pearlite* yang semakin banyak akan memperbesar nilai kekuatan tarik *yield strength* maupun *ultimate strength*.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan Penelitian yang telah dilakukan mengenai pengaruh variasi *heat input* pada proses pengelasan FCAW, dimana nilai *heat input* yang digunakan yaitu 1,19 KJ/mm, 1,32 KJ/mm, dan 1,46 KJ/mm. Dapat disimpulkan menjadi tiga poin, antara lain:

1. Pengujian tarik pada hasil proses pengelasan dengan menggunakan nilai *heat input* 1,46 KJ/mm memiliki nilai kekuatan tarik terbesar yaitu *ultimate strength* sebesar 453,85 MPa. Dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai *heat input* maka nilai kekuatan tariknya akan semakin tinggi.
2. Pada pengujian metalografi, untuk pengamatan struktur makro didapatkan lebar daerah HAZ terlebar adalah pada pengelasan yang menggunakan nilai *heat input* 1,46 KJ/mm, yaitu sebesar 18 mm. Adapun untuk hasil pengamatan struktur mikro, pengelasan dengan menggunakan nilai *heat input* 1,46 KJ/mm memiliki presentase struktur *ferrite* terkecil pada bagian *weld metal* yaitu sebesar 61,1%.
3. Dari pengujian sifat mekanik secara keseluruhan, dapat diambil kesimpulan bahwa nilai kekuatan tarik, lebar daerah HAZ, dan struktur *ferrite pearlite* saling berhubungan. Dimana semakin lebar daerah HAZ yang terbentuk dan atau semakin banyak struktur *pearlite* yang terbentuk, maka nilai kekuatan tarik akan semakin besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kampuh Welding Indonesia, PT. PAL Indonesia, PT. Robutech, dan semua pihak yang telah membantu dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. S. Sidhu and S. S. Chatha, "Role of shielded metal arc welding consumables on pipe weld joint," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 2, pp. 746–750, 2012.
- [2] Wiryosumarto, Harsono, and T. Okumura, *Teknologi Pengelasan Logam*, 8th ed. Jakarta: Pradya Paramita, 2000.
- [3] T. Kannan and N. Murugan, "Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 176, no. 1–3, pp. 230–239, 2006.
- [4] S. A. Mohamat, I. A. Ibrahim, A. Amir, and A. Ghalib, "The effect of flux core arc welding (FCAW) processes on different parameters," *Procedia Eng.*, vol. 41, pp. 1497–1501, 2012.
- [5] A. Parmar and A. Dubey, "Study of heat affected zone for SMAW process for low carbon steel specimen with controlled parameters," *Int. J. Mod. Trends Eng. Res.*, vol. 11, no. 4, pp. 23–28, 2017.
- [6] Y. S. Hadiwidodo, *Perancangan Struktur Baja*. Surabaya: Sinar Gamedia, 2017.

- [7] R. S. Abdel Hameed, "Ranitidine drugs as non-toxic corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid medium," *Port. Electrochim. Acta*, vol. 29, no. 4, pp. 273–285, 2011.
- [8] Biro Klasifikasi Indonesia, *Rules for The Classification and Construction of Sea Going Ship, Volume V, Rules for Material*. Jakarta: Biro Klasifikasi Indonesia, 2018.
- [9] H. R. Ghazvinloo and A. H. Raouf, "Effect of gas-shielded flux cored arc welding parameters on weld width and tensile properties of weld metal in a low carbon steel," *J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 8, pp. 658–663, 2010.
- [10] A. Aloraier, R. Ibrahim, and P. Thomson, "FCAW process to avoid the use of post weld heat treatment," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 83, no. 5, pp. 394–398, 2006.
- [11] I. Bitharas, N. A. McPherson, W. McGhie, D. Roy, and A. J. Moore, "Visualisation and optimisation of shielding gas coverage during gas metal arc welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 255, pp. 451–462, 2018.
- [12] A. Sadek, R. N. Ibrahim, J. W. H. Price, T. Shehata, and M. Ushio, "Effect of welding parameters of FCAW process and shielding gas type on weld bead geometry and hardness distribution (materials, metallurgy & weldability)," *Trans. JWRI*, vol. 30, no. 2, pp. 45–52, 2001.
- [13] ASME Section IX, *Qualification Standard for Welders, Brazers, and Fusing Operators*, vol. 9. New York: The American Society of Mechanical Engineers New York, 2015.