

Analisis Variasi Arus dan Interpass Temperature pada Pengelasan SMAW Terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro, Ferrite Content, dan Ketahanan Korosi Pitting pada Material SA 516 GR 70 CLADDING PLAT SA 240 TP316L

Guntur Irawan^{1*}, Hendri Budi Kurniyanto², Adristi Nisazarifa³

^{1,2,3} Program Studi D4 Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik
Perkapalan Negeri Surabaya

*Corresponding email: irawangubtur@gmail.com

Abstrak: Material SA 516 Grade 70 cladding SA 240 TP316L banyak digunakan pada industri migas, petrokimia, dan pembangkit energi karena mengombinasikan kekuatan mekanik baja karbon dengan ketahanan korosi stainless steel. Kualitas sambungan las dipengaruhi oleh parameter pengelasan, terutama arus dan interpass temperature. Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi arus pengelasan 85 A, 100 A, dan 115 A serta interpass temperature 100°C, 200°C, dan tanpa pengendalian interpass pada proses Shielded Metal Arc Welding (SMAW) terhadap kekerasan, keuletan, struktur mikro, ferrite content, dan ketahanan korosi pitting sambungan cladding SA 516 Gr 70–SA 240 TP316L. Pengujian meliputi struktur mikro, kekerasan Vickers, guided bend, ferrite content, dan korosi pitting. Hasil menunjukkan peningkatan heat input akibat kenaikan arus dan tidak dikendalikannya interpass temperature menurunkan kekerasan HAZ dan weld metal, memperkasar struktur mikro, serta meningkatkan ukuran dan densitas pitting. Ferrite content berada pada kisaran 3,2–5,8 FN, masih memenuhi rentang standar. Uji bending menghasilkan 13 spesimen accepted dan 23 reject.

Kata kunci: *Shielded Metal Arc Welding (SMAW), cladding, arus pengelasan, interpass temperature, ferrite content, korosi pitting.*

Abstract: SA 516 Grade 70 cladded with SA 240 TP316L is widely used in the oil and gas, petrochemical, and power generation industries because it combines the mechanical strength of carbon steel with the corrosion resistance of stainless steel. Weld joint quality is strongly influenced by welding current and interpass temperature. This study analyzed the effect of welding current variations (85 A, 100 A, 115 A) and interpass temperature variations (100°C, 200°C, uncontrolled) during Shielded Metal Arc Welding (SMAW) on hardness, ductility, microstructure, ferrite content, and pitting corrosion resistance of SA 516 Gr 70–SA 240 TP316L cladding joints. Testing included microstructure observation, Vickers hardness, guided bend, ferrite content, and pitting corrosion. Results showed that higher heat input from increased current and uncontrolled interpass temperature reduced HAZ and weld metal hardness, coarsened the microstructure, and increased pit size and density. Ferrite content ranged from 3.2–5.8 FN, within the recommended range. Bending tests yielded 13 accepted and 23 rejected specimens.

Keywords: *Shielded Metal Arc Welding (SMAW), cladding, welding current, interpass temperature, ferrite content, pitting corrosion.*

PENDAHULUAN

Dalam industri migas, petrokimia, dan pembangkit energi, material yang digunakan pada peralatan bertekanan seperti pressure vessel, heat exchanger, dan storage tank dituntut memiliki kombinasi kekuatan mekanik dan ketahanan terhadap lingkungan korosif. Baja karbon SA 516 Grade 70 banyak digunakan karena memiliki kekuatan dan ketangguhan yang baik, sedangkan stainless steel SA 240 TP316L memiliki ketahanan korosi yang tinggi, khususnya terhadap korosi pitting akibat kandungan molibdenum (ASM International, 1990). Untuk meningkatkan efisiensi biaya tanpa mengorbankan ketahanan korosi, kedua material tersebut sering dikombinasikan dalam bentuk cladding.

Proses pengelasan pada material cladding, khususnya dengan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW), sangat dipengaruhi oleh parameter pengelasan seperti arus dan interpass temperature. Parameter ini menentukan besar kecilnya heat input, yang berpengaruh terhadap laju pendinginan dan pembentukan struktur mikro pada weld metal dan Heat Affected Zone/HAZ (Kou, 2003). Perubahan struktur mikro memengaruhi sifat mekanik seperti kekerasan dan keuletan, serta distribusi fasa ferrite–austenite pada stainless steel (Callister & Rethwisch, 2018). Pada stainless steel austenitik seperti TP316L, keberadaan delta ferrite

dalam jumlah tertentu diperlukan untuk mencegah hot cracking selama pengelasan, namun kandungan ferrite yang berlebihan dapat menurunkan ketahanan korosi dan sifat mekanik material (Lippold & Kotecki, 2005).

Permasalahan ini ditemukan secara langsung pada saat pelaksanaan On the Job Training (OJT) di salah satu perusahaan fabrikasi, di mana hasil pengujian ferrite content menunjukkan nilai yang melebihi batas standar yang dipersyaratkan sehingga berpotensi meningkatkan kerentanan terhadap korosi pitting, terutama pada lingkungan yang mengandung ion klorida (Fontana, 2005). Penelitian terdahulu banyak mengkaji pengaruh arus pengelasan atau interpass temperature secara terpisah pada material homogen, sedangkan penelitian yang secara simultan menganalisis pengaruh kedua parameter tersebut terhadap sifat mekanik, struktur mikro, ferrite content, dan ketahanan korosi pitting pada material cladding SA 516 Gr 70–SA 240 TP316L masih terbatas, sehingga menunjukkan adanya research gap yang relevan untuk diteliti.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi arus pengelasan (85 A, 100 A, dan 115 A) serta variasi interpass temperature (100°C, 200°C, dan tanpa kontrol interpass) pada proses SMAW terhadap nilai kekerasan, keuletan, struktur mikro, ferrite content, dan ketahanan korosi pitting pada material SA 516 Gr 70 cladding SA 240 TP316L. Penelitian ini diharapkan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara parameter pengelasan dan karakteristik material, serta menghasilkan rekomendasi parameter optimal untuk menjaga kandungan ferrite tetap sesuai standar dan meningkatkan kualitas sambungan las untuk aplikasi industri.

METODE

Material yang digunakan adalah carbon steel SA 516 Grade 70 cladding plat stainless steel SA 240 TP316L dengan dimensi 150 mm × 150 mm × (25,4 + 3) mm, dibentuk sudut bevel 30° menggunakan plasma cutting untuk membentuk sambungan butt joint V-groove. Pengelasan dilakukan dengan proses SMAW, polaritas DCRP (Direct Current Reverse Polarity), posisi down hand (1G), menggunakan elektroda E309L-16 (root, sisi stainless steel), E7016 (fill-cap, sisi carbon steel), dan E316L-16 (fill-cap, sisi stainless steel setelah gouging), mengacu pada Welding Procedure Specification (WPS).

Penelitian menggunakan rancangan faktorial dengan 9 spesimen (kode A1–C3), yaitu kombinasi 3 variasi arus pengelasan (85 A, 100 A, 115 A) dan 3 variasi interpass temperature (100°C, 200°C, dan tanpa pengendalian interpass), sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1. Interpass temperature diukur menggunakan thermo gun, sedangkan arus dan tegangan aktual dicatat menggunakan tang ampere. Heat input dihitung berdasarkan ASME Section IX QW-409.1.

Tabel 1. Rancangan Variasi Arus Pengelasan dan Interpass Temperature

Kode	Arus (A)	Interpass Temperature	Heat Input Rata-rata (kJ/mm)
A1	85	100°C	1,11
A2	85	200°C	1,09
A3	85	Tanpa interpass	1,07
B1	100	100°C	1,22
B2	100	200°C	1,20
B3	100	Tanpa interpass	1,18

C1	115	100°C	1,36
C2	115	200°C	1,33
C3	115	Tanpa interpass	1,31

Sumber: Data Pribadi

Pengujian yang dilakukan meliputi: (1) ferrite content pada weld metal stainless steel menggunakan Ferritscope berdasarkan prinsip induksi magnetik (AWS A4.2/A4.2M); (2) guided bend test mengacu pada kriteria penerimaan ASME Section IX dengan mandrel berdiameter 38 mm; (3) uji kekerasan Vickers dengan beban 10 kgf selama 10 detik mengacu ASTM E384-17, pada tujuh titik pengamatan yaitu base metal carbon steel, HAZ carbon steel, weld metal E-7016, base metal stainless steel, HAZ stainless steel, weld metal 309L-16, dan weld metal 316L-16; (4) pengamatan metalografi makro dan mikro mengacu ASTM E3 dan ASTM E407 setelah etsa menggunakan larutan nital (carbon steel) dan aqua regia (stainless steel); serta (5) uji ketahanan korosi pitting mengacu ASTM G48 Method A menggunakan larutan FeCl_3 6% (100 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam 900 ml air murni), perendaman spesimen selama 72 jam pada suhu kamar, dengan sisi carbon steel dilindungi coating epoxy Jotun Jotamastic 80 terlebih dahulu. Laju korosi dihitung berdasarkan metode kehilangan massa (ASTM G1) dan densitas pit dievaluasi menggunakan standard rating chart ASTM G46.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian yang dilakukan meliputi ferrite content, guided bend, kekerasan Vickers, pengamatan struktur makro/mikro, dan ketahanan korosi pitting pada sembilan spesimen dengan kombinasi variasi arus pengelasan dan interpass temperature. Hasil dari masing-masing pengujian dipaparkan dan dianalisis pada bagian berikut.

Ferrite Content

Kandungan ferit yang terlalu rendah dapat menyebabkan material rentan mengalami hot cracking saat pengelasan, sedangkan kandungan ferit yang terlalu tinggi dapat menurunkan ketahanan korosi dan sifat mekanik material (AWS, 2020). Rentang ferrite content yang direkomendasikan untuk logam las stainless steel austenitik berada pada kisaran 3–10 FN. Hasil pengujian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa seluruh spesimen berada pada rentang 3,2–5,8 FN, dengan nilai tertinggi pada spesimen B3 (100 A tanpa interpass) sebesar 5,8 FN dan nilai terendah pada spesimen C2 (115 A, interpass 200°C) sebesar 3,2 FN.

Tabel 2. Rata-rata Ferrite Content pada Weld Metal Stainless Steel

Kode	Arus (A)	Interpass	Rata-rata Ferrite Content (FN)
A1	85	100°C	4,5
A2	85	200°C	4,5
A3	85	Tanpa interpass	4,7
B1	100	100°C	5,1
B2	100	200°C	4,0
B3	100	Tanpa interpass	5,8
C1	115	100°C	4,5
C2	115	200°C	3,2
C3	115	Tanpa interpass	4,3

Sumber: Data Pribadi

Spesimen yang dilas tanpa pengendalian interpass menunjukkan variasi nilai ferrite content yang lebih besar dibandingkan spesimen dengan interpass 100°C maupun 200°C, menunjukkan bahwa pengendalian temperatur antar lintasan berperan dalam menjaga kestabilan siklus termal sehingga pembentukan ferit selama solidifikasi berlangsung lebih seragam. Meskipun demikian, seluruh nilai yang diperoleh masih berada dalam rentang yang direkomendasikan sehingga mampu menyeimbangkan risiko hot cracking dan penurunan ketahanan korosi (Lippold & Kotecki, 2005).

Uji Bending

Uji bending dilakukan pada 36 spesimen (4 spesimen tiap kode) berdasarkan kriteria penerimaan ASME Section IX. Hasil pada Tabel 3 menunjukkan 13 spesimen accepted dan 23 spesimen reject. Spesimen dengan arus 85 A (A1–A3) seluruhnya reject akibat lack of fusion karena arus terlalu rendah sehingga weld metal dan base metal tidak menyatu sempurna. Spesimen B3 mengalami slag inclusion yang berpotensi menjadi titik awal retak, sedangkan spesimen C1 mengalami crack dan spesimen C3 bersifat brittle (getas) akibat pengelasan tanpa pengendalian interpass temperature, menyebabkan weld metal kehilangan keuletannya. Spesimen dengan interpass 100°C (B1) dan interpass 200°C pada arus 115 A (C2) menunjukkan hasil accepted secara keseluruhan, mengindikasikan bahwa pengendalian interpass temperature berperan penting terhadap keuletan sambungan las.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Uji Bending

Kode	Jumlah Diuji	Accepted	Reject	Jenis Diskontinuitas Dominan
A1	4	0	4	Lack of fusion
A2	4	0	4	Lack of fusion
A3	4	0	4	Lack of fusion
B1	4	4	0	–
B2	4	3	1	Crack
B3	4	0	4	Slag inclusion
C1	4	2	2	Crack
C2	4	4	0	–
C3	4	0	4	Brittle
Total	36	13	23	

Sumber: Data Pribadi

Uji Kekerasan (Hardness)

Uji kekerasan Vickers dilakukan pada tujuh area pengamatan dengan tiga titik ulangan tiap area. Nilai rata-rata kekerasan setiap spesimen ditampilkan pada Tabel 4. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada base metal stainless steel spesimen B3 sebesar 241,23 kgf/mm², sedangkan nilai terendah terdapat pada weld metal 316L-16 spesimen C3 sebesar 152,16 kgf/mm². Nilai kekerasan base metal carbon steel relatif stabil pada kisaran 158,26–161,52 kgf/mm² karena tidak mengalami perubahan struktur mikro akibat siklus termal pengelasan.

Tabel 4. Rata-rata Nilai Kekerasan Vickers (kgf/mm²)

Kode	BM CS	HAZ CS	WM E-7016	BM SS	HAZ SS	WM 309L	WM 316L
A1	159,30	199,26	175,20	239,87	176,14	184,22	171,01
A2	160,29	198,83	172,74	240,33	172,14	180,15	167,18
A3	159,38	191,11	168,22	240,65	169,15	176,22	164,15
B1	158,89	199,18	172,63	240,30	170,26	178,29	165,18
B2	161,52	191,30	171,32	241,11	166,14	174,23	161,26
B3	160,70	174,70	160,95	241,23	162,92	171,04	158,23
C1	160,19	191,38	171,36	240,87	164,18	172,17	159,14
C2	161,11	174,31	169,98	241,11	160,29	168,30	155,19
C3	158,26	174,03	160,90	240,93	157,04	165,10	152,16

BM CS = base metal carbon steel; HAZ CS = HAZ carbon steel; WM = weld metal; BM SS = base metal stainless steel; HAZ SS = HAZ stainless steel. Sumber: Data Pribadi

Perubahan paling signifikan terjadi pada daerah HAZ dan weld metal. Nilai kekerasan HAZ carbon steel tertinggi diperoleh pada spesimen A1 (85 A, interpass 100°C) sebesar 199,26 kgf/mm², sedangkan nilai terendah pada spesimen C3 (115 A tanpa interpass) sebesar 174,03 kgf/mm². Pola serupa terlihat pada weld metal E7016, E309L-16, dan E316L-16 yang cenderung menurun seiring meningkatnya heat input. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan arus pengelasan dan tidak dikendalikannya interpass temperature memperlambat laju pendinginan sehingga terjadi pertumbuhan butir (grain coarsening) yang menurunkan nilai kekerasan, sejalan dengan Kou (2003) dan Callister & Rethwisch (2018).

Struktur Makro dan Mikro

Pengamatan makro menunjukkan bahwa pada arus 85 A penetrasi las cenderung dangkal sehingga pada beberapa spesimen ditemukan indikasi lack of fusion akibat heat input yang rendah, sedangkan peningkatan arus hingga 115 A menghasilkan penetrasi lebih baik namun memperlebar daerah HAZ akibat meningkatnya heat input. Penggunaan interpass temperature 100°C menghasilkan bentuk manik las yang lebih seragam dan batas fusi yang lebih jelas dibandingkan interpass 200°C maupun tanpa pengendalian interpass, menunjukkan bahwa pengendalian temperatur interpass menjaga kestabilan siklus termal selama pengelasan berlangsung (Lippold & Kotecki, 2005).

Pengamatan mikro pada base metal carbon steel memperlihatkan fasa ferrite dan pearlite dengan morfologi relatif seragam pada seluruh spesimen karena tidak terkena siklus termal secara langsung. Pada daerah HAZ dan weld metal, semakin besar heat input akibat kenaikan arus maupun tanpa pengendalian interpass temperature, semakin besar kecenderungan pertumbuhan butir sehingga struktur mikro menjadi lebih kasar dan sifat mekanik material menurun, konsisten dengan hasil uji kekerasan pada bagian sebelumnya (Dieter, 1986).

Ketahanan Korosi Pitting

Uji ketahanan korosi pitting dilakukan sesuai ASTM G48 Method A menggunakan larutan FeCl₃ selama 72 jam. Hasil perhitungan mass loss corrosion rate serta evaluasi ukuran dan densitas pit ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji Korosi Pitting

Kode	Mass Loss (g/cm ²)	Ukuran Pit Rata-rata (mm ²)	Densitas Pit (pit/m ²)
A1	0,0286	0,199	212.256
A2	0,0350	0,121	218.994
A3	0,0362	0,669	365.000
B1	0,0337	0,105	250.419
B2	0,0442	0,115	247.919
B3	0,0606	0,965	225.013
C1	0,0468	0,141	256.235
C2	0,0492	0,205	345.424
C3	0,0609	1,098	277.404

Sumber: Data Pribadi

Spesimen A1 (85 A, interpass 100°C) menunjukkan ketahanan korosi terbaik dengan ukuran pitting 0,199 mm² dan densitas 212.256 pit/m². Sebaliknya, spesimen C3 (115 A, tanpa interpass) menghasilkan ukuran pitting terbesar yaitu 1,098 mm² dengan densitas 277.404 pit/m², sedangkan densitas pitting tertinggi diperoleh pada spesimen A3 (85 A tanpa interpass) sebesar 365.000 pit/m². Secara umum, penggunaan interpass temperature 100°C menghasilkan ketahanan korosi pitting yang lebih baik dibandingkan interpass 200°C maupun tanpa pengendalian interpass, sedangkan peningkatan arus pengelasan cenderung meningkatkan heat input yang dapat menurunkan ketahanan korosi apabila tidak diimbangi pengendalian temperatur antar lapisan. Hasil ini sejalan dengan ASTM G46 yang menyatakan bahwa ukuran pit menunjukkan tingkat propagasi korosi, sedangkan densitas pit menunjukkan jumlah lokasi inisiasi korosi pada permukaan material. Ferrit yang berlebihan atau terdistribusi tidak merata dapat menyebabkan segregasi unsur paduan sehingga menurunkan kandungan kromium efektif pada daerah tertentu dan menurunkan ketahanan terhadap korosi pitting (Sedriks, 1996).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi arus pengelasan dan interpass temperature pada proses SMAW terhadap sifat mekanik, struktur mikro, ferrite content, dan ketahanan korosi pitting pada material cladding SA 516 Grade 70–SA 240 TP316L, dapat disimpulkan sebagai berikut: variasi arus pengelasan dan interpass temperature berpengaruh terhadap distribusi kekerasan pada daerah HAZ dan weld metal, sedangkan pengaruhnya pada base metal relatif kecil; nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada spesimen A1 (85 A, interpass 100°C) dan cenderung menurun pada spesimen dengan heat input lebih tinggi; uji bending menghasilkan 13 dari 36 spesimen accepted, dengan kegagalan utama berupa lack of fusion pada arus rendah, slag inclusion, crack, dan sifat brittle pada pengelasan tanpa pengendalian interpass, menunjukkan pentingnya pengendalian interpass temperature terhadap keuletan sambungan; heat input yang lebih tinggi akibat kenaikan arus maupun tanpa pengendalian interpass temperature menyebabkan pertumbuhan butir dan struktur mikro yang lebih kasar pada daerah HAZ dan weld metal; ferrite content seluruh spesimen berada pada rentang 3,2–5,8 FN, masih memenuhi rentang yang direkomendasikan (3–10 FN) untuk logam las stainless steel austenitik; pengendalian interpass temperature berperan penting dalam menjaga ketahanan korosi pitting, dengan spesimen A1 menunjukkan ketahanan korosi terbaik dan

spesimen C3 (115 A tanpa interpass) menunjukkan ukuran pitting terbesar. Analisis Three-Way ANOVA mengonfirmasi bahwa arus pengelasan, interpass temperature, dan interaksi keduanya berpengaruh signifikan ($p < 0,05$) terhadap karakteristik sambungan las, sehingga pengendalian kedua parameter tersebut menjadi faktor penting untuk memperoleh keseimbangan sifat mekanik dan ketahanan korosi pada sambungan cladding SA 516 Gr 70–SA 240 TP316L.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi D4 Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, serta kepada dosen pembimbing atas bimbingan dan arahan selama penelitian ini berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM International. (1990). ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. Materials Park, OH: ASM International.
- ASM International. (2004). ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures. Materials Park, OH: ASM International.
- ASME. (2023). ASME Sec. IX Welding, Brazing and Fusing Qualification. New York: ASME.
- ASTM. (2017). ASTM E384-17 Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. ASTM International.
- ASTM. (2019). ASTM G48: Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- AWS. (2020). AWS A4.2/A4.2M: Standard Procedures for Calibrating Magnetic Instruments to Measure Delta Ferrite in Austenitic and Duplex Stainless Steel Castings and Weld Metal. Miami: American Welding Society.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction (9th ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Dieter, G. E. (1986). Mechanical Metallurgy (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Field, A. (2018). Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics (5th ed.). London: SAGE Publications.
- Fontana, M. G. (2005). Corrosion Engineering (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Kou, S. (2003). Welding Metallurgy (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Lippold, J. C., & Kotecki, D. J. (2005). Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2019). Design and Analysis of Experiments (9th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Mubarak, F., et al. (2025). Analisis pengaruh variasi arus las terhadap laju korosi dan kekuatan tarik pengelasan dissimilar baja ASTM A36 dan Stainless Steel SS304. Jurnal Teknik Material, 12(1), 33–41.
- Pratama, A. A. (2022). Analisis Pengaruh Variasi Desain Sambungan Las Baja SA 516 Grade 70 Cladding Plat SA 240 TP 316L terhadap Ketahanan Korosi Pitting, Dilusi, dan Kekerasan. Skripsi. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- Sedriks, A. J. (1996). Corrosion of Stainless Steels (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Susanto, R. A. D. (2025). Analisis Variasi Kuat Arus dan Jumlah Layer pada Proses Overlay Material SA 516 Grade 70 Cladding Plat SA 240 TP 316L terhadap Nilai Kekerasan, Metallografi, dan Ketahanan Korosi Pitting. Skripsi. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.