

# Pengaruh Sudut Single V Joint terhadap Laju Korosi, Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Pelat Baja A36 dengan Pengelasan SMAW Menggunakan Elektroda E7018 pada Lingkungan Laut

Fajar Putra Cahyadi dan Hari Subiyanto

Departemen Teknik Mesin Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*e-mail*: robin@me.its.ac.id

**Abstrak**—Variasi sudut *single V joint* mempengaruhi deposit bahan tambah dan efisiensi sambungan pengelasan pada pelat baja A36. Sudut pengelasan 55°, 65°, dan 75° diuji dengan elektroda E7018, diameter 3,2 mm. Pengujian korosi menggunakan NaCl 3,5% sebagai media dengan laju korosi meningkat seiring peningkatan sudut pengelasan. Pada sudut 55°, laju korosi HAZ adalah 0.29 mm/year dan WM 0.36 mm/year. Sudut 65° memiliki laju korosi HAZ 0.94 mm/year dan WM 1.66 mm/year. Sudut 75° memiliki laju korosi HAZ 2.73 mm/year dan WM 6.55 mm/year. Pengujian tarik menunjukkan patahan pada *base metal* yang menunjukkan kecocokan pemilihan elektroda dan metode *multipass* pengelasan. Patahan juga terjadi pada *weld metal* akibat porositas. Sudut *single V joint* juga mempengaruhi ukuran butir pada HAZ dan *weld metal* dengan peningkatan sudut menyebabkan peningkatan ukuran butir. Transformasi fasa tidak terjadi dalam semua variasi sudut.

**Kata Kunci**—Korosi, Pengelasan, Single V Joint, Tiga Sel Elektroda, Variasi Sudut.

## I. PENDAHULUAN

PENGELASAN sangat penting dalam perancangan manufaktur, terutama dalam industri konstruksi lepas pantai, untuk menggabungkan berbagai material dengan efisiensi tinggi dan nilai ekonomis yang baik. Proses pengelasan menyatukan bahan dari jenis atau kelas dasar yang sama melalui pembentukan ikatan kimia di bawah aksi panas dan tekanan.

Industri konstruksi lepas pantai memanfaatkan *subsea system*, yaitu sistem yang berada di dasar laut dalam. Sistem ini membutuhkan jalur pipa untuk mencapai area yang sebelumnya tidak dapat dijangkau oleh jalur pipa yang sudah ada. Jalur pipa-pipa ini kemudian digabungkan melalui proses pengelasan untuk membentuk struktur komponen dengan berbagai fungsi, seperti dalam *Pipeline End Manifold* (PLEM). Komponen – komponen dalam konstruksi lepas pantai sangat rentan terhadap kerusakan akibat korosi yang disebabkan oleh air laut. Fenomena ini terjadi secara alami dan juga tidak dapat dihindarkan. Korosi sangat mempengaruhi umur rata – rata konstruksi bangunan lepas pantai industri minyak dan gas. Korosi ini sering merusak kekuatan bangunan sehingga perlu adanya reparasi atau penggantian jacket/modul ketika konstruksi bangunan sudah dinilai beresiko. Kegagalan ini harus dihindari untuk meminimalisir terjadinya dampak kerugian yang fatal dalam dunia konstruksi lepas pantai.

Ketahanan korosi dalam pengelasan pelat baja karbon menjadi faktor kunci dalam sambungan yang optimal. Variasi

bentuk kampuh mempengaruhi kekuatan dan laju korosi hasil pengelasan. Pemilihan kampuh *single V joint* dengan sudut yang tepat penting untuk beban statis dan dinamis. Kampuh akan menampung bahan pengisi yang mencair akibat energi panas sehingga merekat ke *base metal*. Penggunaan jig saat pengelasan dapat mencegah distorsi, tetapi meningkatkan *internal stress* yang mempengaruhi tingkat korosi pada sambungan. Upaya menghindari korosi penting untuk konstruksi lepas pantai. Maka dari itu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh sudut *single V joint* terhadap laju korosi pelat baja A36 dengan pengelasan SMAW menggunakan elektroda E7018 pada lingkungan laut.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### A. Pengelasan

Pengelasan adalah proses di mana bahan dari jenis atau kelas dasar yang sama disatukan sehingga menyebabkan material bergabung melalui pembentukan ikatan kimia primer dan/atau sekunder di bawah aksi gabungan panas dan tekanan [1].

### B. Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

*Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) adalah proses pengelasan dalam peleburan cepat logam yang dihasilkan oleh kekencangan busur listrik yang dipertahankan antara ujung elektroda habis pakai dan permukaan logam dasar pada sambungan yang dilas. Ini adalah proses las busur yang paling umum digunakan, peralatannya cepat, tukang las memiliki lebih banyak kebebasan bergerak, dan dimungkinkan untuk mengelas berbagai macam logam hanya dengan menjepit jenis elektroda [2].

### C. Elektroda

Elektroda dalam pengelasan busur terdiri dari elektroda karbon dan logam, terbagi menjadi terbungkus dan tidak terbungkus fluks. Elektroda E7018 terbungkus fluks serbuk besi digunakan dalam penelitian ini, cocok untuk pengelasan baja dengan kelas uji tarik tinggi, dan dapat diaplikasikan pada berbagai posisi dan jenis arus.

### D. Baja

Baja adalah paduan logam besi dengan unsur karbon sebagai paduan utamanya. Baja karbon rendah memiliki kandungan karbon antara 0,05 - 0,3% berat, dengan kekuatan tarik 60.000 - 80.000 psi dan kekuatan luluh 40.000 psi. Baja ini cocok untuk aplikasi struktur bangunan, kendaraan, dan beton. Baja ASTM A36 termasuk dalam kategori baja karbon

Tabel 1  
Standar ASTM A36

Standar Equivalent				
ASTM/ASME	JIS	DIN/BS	GB	
A36	JIS G3101 SS330	EN10025 S185	GB700 Q235	
Komposisi Kimia				
C	Si	Mn	P	S
≤0,25	≤0,40	≤0,80 – 1,20	≤0,04	≤0,05
Mechanical Properties				
Tensile Strength, Ultimate Ksi [MPa]	Tensile Strength, Yield		Elongation 2in.[50mm], mnt,	
50-80 [400-550]	Min, ksi [MPa]	36 [250]	%	
			23	

Tabel 2.  
Parameter Pengelasan

Logam Dasar	Detail Sambungan
ASTM A36	Sambungan : Single V Joint
	Jumlah Layer : 4 Layer
Teknik : SMAW	Jig : Ya
Proses : SMAW	Posisi Pengelasan : 1G
Elektroda : E7018 Ø3,2	Sudut Kampuh : 55°. 65° dan 75°
Arus : 120A	Root Gap : 2 mm
Polaritas : DCEP	Root Face : 2 mm
Preheat : Tidak	Ketebalan Pelat : 12 mm

rendah dengan kandungan 0,1% - 0,3% berat, sering digunakan untuk konstruksi berkat sifatnya yang cocok untuk perlakuan panas. Standar ASTM A36 tertera pada Tabel 1.

E. Heat Input

Heat input adalah masukan panas sebagai sumber energi saat pengelasan yang merupakan hasil dari tegangan, arus dan kecepatan pengelasan. Hubungan ketiganya menghasilkan energi las yang akan mempengaruhi hasil pengelasan. Heat input akan mempengaruhi laju pendinginan las yang nantinya akan berakibat pada struktur mikro pada hasil las. Heat input yang tinggi menyebabkan terjadinya distorsi yang besar akibat meningkatnya tegangan sisa pada pengelasan.

$$HI (Heat Input) = \frac{Tegangan \times Arus}{Kecepatan Pengelasan} \eta$$

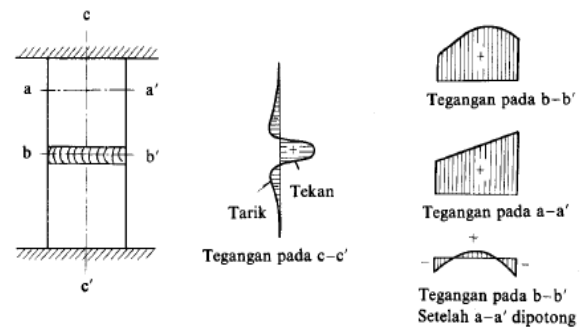
F. Sambungan Las

Sambungan las merupakan sambungan antara dua logam dengan cara pemanasan. Variasi sudut pada single V joint berhubungan dengan distorsi pada pengelasan. Semakin besar sudut kampuh, semakin besar kemungkinan nilai distorsi yang dihasilkan, dipengaruhi oleh deposit bahan tambah yang lebih besar.

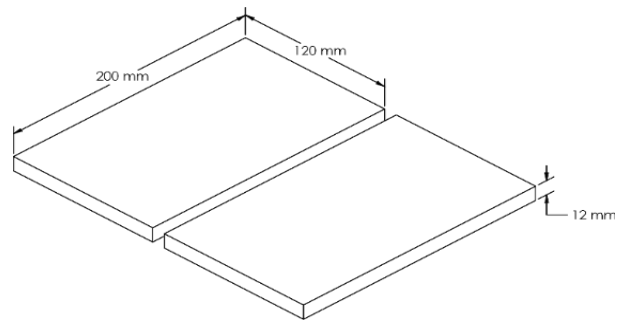
Pengelasan menyebabkan distorsi pada benda kerja karena penyusutan pematatan dan kontraksi termal logam las, yang menghasilkan distorsi sudut ke atas yang dapat dikurangi dengan mengurangi volume logam las [3]. Dalam kasus ini, beberapa logam dilindungi tertentu dapat terkorosi dengan cepat jika berhubungan dengan tegangan tarik (stress corrosion cracking) dimana sambungan dalam kondisi las yang mengandung tegangan sisa akan mengalami serangan korosi yang berlebihan [2].

G. Tegangan Sisa

Pada lasan konstruksi bebas, terjadi tegangan tarik memanjang di sekitar garis las dan tegangan tekan pada jarak lebih jauh yang seimbang. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan tegangan sisa adalah batas transformasi dan



Gambar 1. Tegangan Sisa Karena Penahan Luar.



Gambar 2. Dimensi Base Metal.

batas luluh bahan, suhu pemanasan tinggi, kecepatan pendinginan, tahanan luar, dan pemanasan mula [4]. Tegangan sisa karena penahan luar tertera pada Gambar 1.

H. Multipass

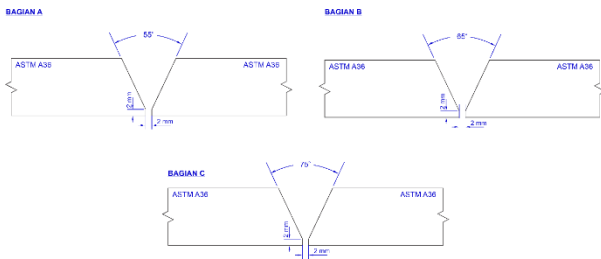
Pengelasan multipass adalah suatu metode pengelasan yang melibatkan penerapan beberapa lintasan las pada satu sambungan. Dalam metode ini, setiap lintasan las diterapkan secara bertahap dan dibiarkan mendingin sebelum lintasan berikutnya ditambahkan. Pendekatan ini melibatkan penggunaan lebih banyak logam las, yang menghasilkan sambungan yang memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengelasan tunggal.

Pengelasan berulang / multipass pada baja dapat menyebabkan HAZ (Heat-Affected Zone) dari pengelasan berikutnya menggantikan zona fusi dari pengelasan sebelumnya, dan pematatan butir zona fusi yang kasar dapat meningkatkan ketangguhan logam las [3].

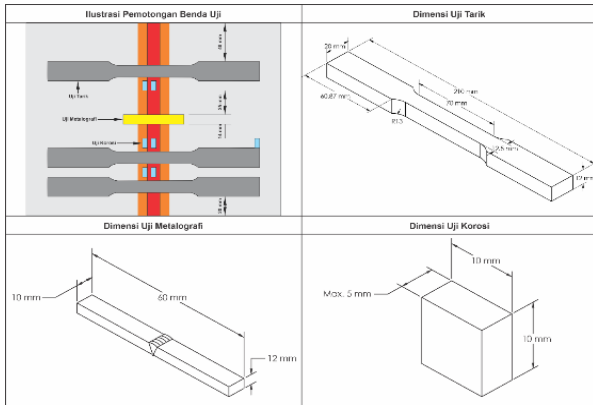
I. Korosi

Korosi didefinisikan sebagai penghancuran atau kerusakan material karena reaksi dengan lingkungan [5]. Stress corrosion cracking (SCC) adalah penggambaran istilah kegagalan material yang terjadi secara perlahan dikarenakan oleh lingkungan propagasi retak. Perambatan retak ini merupakan hasil gabungan dan sinergis interaksi antara tegangan mekanik dan reaksi korosi [6]. Tegangan sisa pengelasan dan mekanis merupakan sumber utama tegangan yang biasanya dikaitkan dengan retak korosi tegangan akibat perubahan suhu yang berbeda selama terjadinya pengelasan [7].

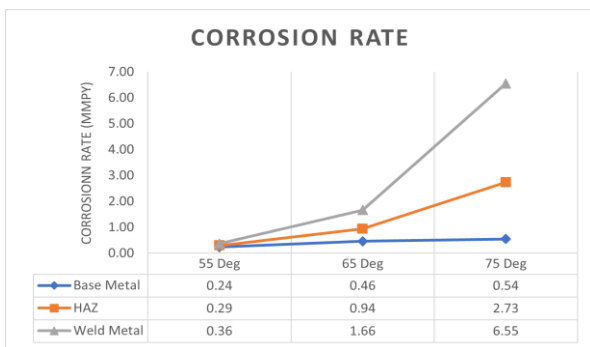
Konsentrasi ion hidroksida (OH-) dan ion klorida (Cl-) di dalam retakan dapat meningkat secara bertahap seiring dengan perkembangan korosi retakan pada baja karbon dalam larutan asam yang mengandung ion klorida (Cl-). Hal ini menyebabkan peningkatan pembubaran anodik pada bagian dalam baja, yang pada gilirannya berkontribusi pada pergeseran potensial korosi internal baja ke arah yang lebih



Gambar 3. Kampuh Single V Joint.



Gambar 4. Dimensi Benda Uji.



Gambar 5. Rata – Rata Corrosion Rate.

negatif. Dengan adanya konsentrasi ion klorida (Cl<sup>-</sup>) dalam larutan, pembubaran baja dan evolusi hidrogen dapat dipercepat [8].

### III. METODOLOGI

#### A. Studi Literatur

Untuk melakukan penelitian ini, pengumpulan materi dan literatur berupa buku, jurnal, *paper* dan tugas akhir menjadi referensi dalam pelaksanaan penelitian. Studi literatur ini nantinya akan menjadi referensi atau acuan yang permasalahannya saling berhubungan dengan penelitian yang dilakukan ini.

#### B. Observasi Lapangan

Tahap ini merupakan proses pemerolehan data informasi sebagai bukti konkret yang nantinya akan dianalisis. Observasi lapangan ini akan menjadi referensi yang saling berhubungan dengan penelitian yang akan dilakukan. Metode eksperimental digunakan dalam penelitian ini yang melibatkan modifikasi untuk mencapai target yang akan dicapai.

#### C. Material ASTM A36

Penelitian ini menggunakan material ASTM A36. Material ASTM A36 dibentuk persegi dengan panjang 200 mm, lebar

Tabel 3.  
Procedure Qualification Record (PQR)

Sudut Kampuh	Weld Pass	Panjang (mm)	Waktu	Travel Speed (mm/min)
55°	Root	200	1 Menit 14 Detik	162.16
	Hot Pass	200	1 Menit 37 Detik	131.87
	Fill	200	2 Menit 17 Detik	87.59
	Cap	200	2 Menit 24 Detik	83.30
65°	Root	200	3 Menit 6 Detik	64.52
	Hot Pass	200	1 Menit 38 Detik	122.45
	Fill	200	2 Menit 46 Detik	71.43
	Cap	200	3 Menit 2 Detik	65.93
75°	Root	200	4 Menit 49 Detik	41.52
	Hot Pass	200	2 Menit 16 Detik	88.24
	Fill	200	3 Menit 12 Detik	62.50
	Cap	200	3 Menit 19 Detik	60.30

Tabel 4.  
Data Lebar dan Sudut HAZ

Sudut Kampuh	Lebar HAZ	Sudut HAZ
55o	Kanan : 2,12 mm	62o
	Kiri : 2,26 mm	
65o	Kanan : 2,79 mm	53o
	Kiri : 2,80 mm	
75o	Kanan : 3,00 mm	46o
	Kiri : 3,14 mm	

120 mm dan tebal 12 mm. Gambar 2 merupakan dimensi base metal.

#### D. Pembuatan Kampuh

Kampuh las merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pengelasan karena menampung bahan pengisi (*filler*) agar merekat pada *base metal*. Jenis kampuh yang digunakan dalam penelitian ini adalah *single V joint* dengan variasi sudut 55°, 65°, dan 75°. Kampuh single V joint tertera pada Gambar 3.

#### E. Tahap Pengelasan

Proses pengelasan dan penggabungan dua pelat baja ASTM A36 ini memiliki parameter tertera pada Tabel 2.

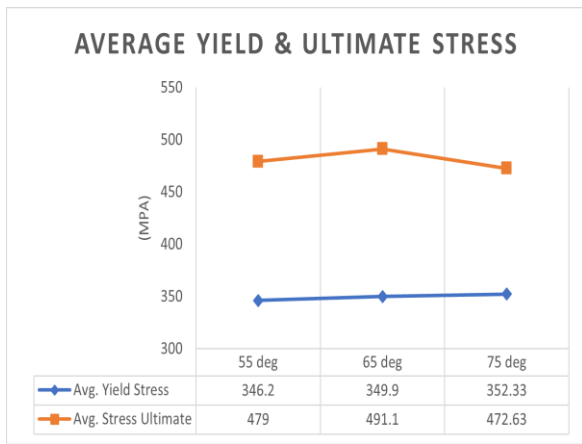
#### F. Pembuatan Benda Uji

Proses pembuatan spesimen pada material ASTM A36 dilakukan sesuai dengan pengujian yang akan dilakukan. Gambar 4 menunjukkan dimensi uji.

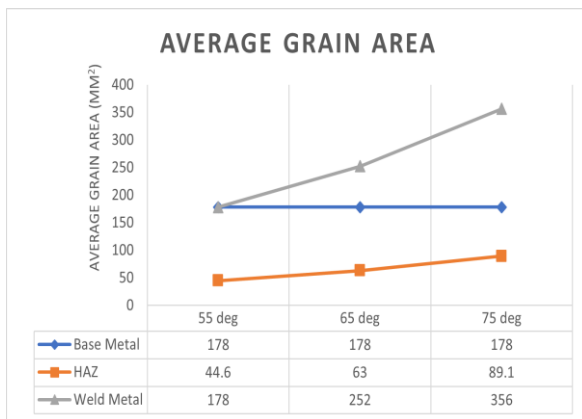
#### G. Tahap Pengujian

Tahap pengujian merupakan proses untuk menjamin kualitas hasil lasan sesuai dengan ketentuan dan standar yang digunakan. Pengujian yang dilaksanakan menggunakan pengujian tarik, metalografi dan korosi.

Uji Korosi. Uji korosi bertujuan untuk mengetahui laju korosi pada suatu material. Uji korosi pada penelitian ini menggunakan metode tiga sel elektroda yang berdasarkan ASTM G5 “*Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*”.



Gambar 6. Average Yield & Ultimate Stress pada Patahan Base Metal.



Gambar 7. Average Grain Area.

Elektroda digunakan sebagai sampel hasil pengelasan dalam sel elektrokimia untuk pengujian laju korosi pada daerah *weld metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *base metal*. Elektroda acuan menggunakan *saturated calomel electrode* (SCE), sedangkan elektroda pembantu menggunakan grafit. Pengujian dilakukan dengan larutan NaCl 3,5% menggunakan alat CorrTest Electrochemical Workstation terhubung dengan software CS Studio5.

Uji Tarik. Pengujian tarik ini menggunakan standar ASTM E8 “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”. Pegujian ini bertujuan untuk mengukur ketahanan material ASTM 36 terhadap gaya statis yang diberikan secara lambat.

Uji Metalografi. Pengujian metalografi ini menggunakan standar ASTM E3-01 “*Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*”. Pembesaran yang dilakukan dari pengamatan struktur mikro menggunakan pembesaran 500x. Pengujian ini menggunakan larutan HNO<sub>3</sub> dan larutan alkohol 98% sebagai larutan etsa.

H. Analisa Data

Tahapan akhir dari penelitian ini adalah analisa data dari hasil eksperimen pengujian. Data tersebut dianalisa sesuai dengan standar yang menjadi pedoman penelitian sehingga tujuan dari permasalahan yang sudah ditetapkan dapat tercapai.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap pelaksanaan penelitian merupakan proses dilaksanakannya pengelasan sesuai dengan ketentuan dan

Tabel 5. Hasil Uji Korosi

Sudut		I0 (Amps/cm <sup>2</sup> )	E0 (Volts)	Corrosion Rate (mm/year)
55°	BM 1	2.02 x 10 <sup>-5</sup>	-0.55	0.24
	1	2.37 x 10 <sup>-5</sup>	-0.52	0.28
	HAZ 2	2.39 x 10 <sup>-5</sup>	-0.52	0.28
	3	2.81 x 10 <sup>-5</sup>	-0.52	0.33
	1	2.82 x 10 <sup>-5</sup>	-0.53	0.33
	2	2.83 x 10 <sup>-5</sup>	-0.58	0.33
65°	3	3.75 x 10 <sup>-5</sup>	-0.68	0.44
	BM 1	3.95 x 10 <sup>-5</sup>	-0.58	0.46
	1	6.27 x 10 <sup>-5</sup>	-0.60	0.73
	HAZ 2	7.77 x 10 <sup>-5</sup>	-0.62	0.90
	3	10.15 x 10 <sup>-5</sup>	-0.60	1.18
	1	13.32 x 10 <sup>-5</sup>	-0.62	1.55
75°	2	13.37 x 10 <sup>-5</sup>	-0.65	1.55
	3	16.16 x 10 <sup>-5</sup>	-0.58	1.88
	BM 1	4.37 x 10 <sup>-5</sup>	-0.60	0.54
	1	23.43 x 10 <sup>-5</sup>	-0.50	2.72
	HAZ 2	23.59 x 10 <sup>-5</sup>	-0.59	2.74
	3	40.07 x 10 <sup>-5</sup>	-0.60	4.66
	1	55.18 x 10 <sup>-5</sup>	-0.60	6.41
	2	57.55 x 10 <sup>-5</sup>	-0.61	6.69
	3	102.35 x 10 <sup>-5</sup>	-0.59	11.90

Tabel 6. Hasil Uji Tarik

Sudut Kampuh	Yield Force (Kgf)	Force Ultimate (Kgf)	Yiled Stress (Mpa)	Stress Ultimate (Mpa)	Patahan	
1	5626.6	7857.0	330.8	461.9	Weld Metal	
55°	2	5386.3	6281.0	366.8	427.7	Weld Metal
	3	5634.2	7796.6	346.2	479.0	Base Metal
	1	5694.3	7991.8	349.9	491.1	Base Metal
65°	2	5826.4	7730.1	369.1	489.7	Weld Metal
	3	5594.7	6969.7	360.0	448.5	Weld Metal
	1	5652.1	7194.3	375.5	478.0	Base Metal
75°	2	5347.4	7476.3	338.8	473.6	Base Metal
	3	5661.9	7702.5	342.7	466.3	Base Metal
						Metal

standar yang digunakan. Seluruh rangkaian pengelasan akan tercatat pada *Procedure Qualification Record* (PQR) sebagai data catatan pengelasan. Tabel 3 menunjukkan pelaksanaan pengelasan SMAW dengan elektroda E7018 terhadap baja karbon rendah ASTM A36 dengan variasi sudut *single V joint* 55°, 65° dan 75° dalam penelitian ini.

A. Pengujian Makro

Uji etsa makro adalah sebuah teknik untuk mengevaluasi struktur makro dari hasil pengelasan yang telah dilakukan. Hasil yang didapat dari pengujian makro adalah sebagai acuan dalam menentukan daerah HAZ yang nantinya akan dilakukan pengujian korosi. Data lebar dan sudut HAZ tertera pada Tabel 4.

B. Pengujian Korosi

Pengujian korosi menggunakan metode potensiostat dilaksanakan untuk memperoleh pemahaman dan karakterisasi mengenai perilaku korosi pada material hasil pengelasan ASTM A36 *single V joint* dengan variasi sudut kampuh. Dalam pengujian ini, berbagai daerah pada sambungan las, termasuk *base metal*, *Heat-Affected Zone*

Tabel 7.  
Data Perhitungan Pendekatan Stress Ultimate Efektif

Sudut		Luas Sketch (mm <sup>2</sup> )	Total Cacat Sketch (mm <sup>2</sup> )	Cacat Aktual (mm <sup>2</sup> )	Luas Tanpa Cacat (mm <sup>2</sup> )	Force Ultimate Efektif (Kgf)	Stress Ultimate Efektif (MPa)
55°	1	2306.9	59.4	4.29	162.51	8064.66	474.14
	2	2794.9	257.9	13.29	130.71	6919.5	471.23
65°	2	889.5	11.6	2.02	152.78	7832.24	496.18
	3	2333	197	12.87	139.53	7612.5	489.85

Tabel 8.  
Perhitungan Grain Size Area

Sudut		TP	KL	PL	L3	G	AVG No.	AVG Grain Area (µm <sup>2</sup> )	
55°	BM1	37	250.00			9.12			
	BM2	29	166.70			9.59	9.5	178	
	BM3	14	83.30			9.49			
	HAZ1	70	250.00			10.96			
	HAZ2	58	166.70			11.59	11.5	44.6	
	HAZ3	27	83.30			11.39			
	WM 1	33	250.00			8.79			
	WM 2	32	166.70			9.88	9.5	178	
	WM 3	18	83.30			10.22			
	BM 1	41	250.00			9.42			
65°	BM 2	28	166.70			9.49	9.5	178	
	BM 3	17	83.30			10.05			
	HAZ1	66	250.00			10.79			
	HAZ2	52	166.70	$\frac{TP}{\left(\frac{KL}{500}\right)}$	$\frac{1}{Pl}$	11.28	11	63	
	HAZ3	25	83.30			11.16			
	WM 1	32	250.00			8.71			
	WM 2	24	166.70			9.04	9	252	
	WM 3	15	83.30			9.69			
	75°	BM 1	46	250.00			9.75		
		BM 2	27	166.70			9.38	9.5	178
BM 3		12	83.30			9.05			
HAZ1		62	250.00			10.61			
75°	HAZ2	37	166.70			10.29	10.5	89.1	
	HAZ3	22	83.30			10.80			
	WM 1	26	250.00			8.11			
	WM 2	20	166.70			8.52	8.5	356	
	WM 3	10	83.30			8.52			

\* TP - Titik Potong \* KL Keliling Lingkaran G = [-6.646 logL3] - 3.298

(HAZ), dan *weld metal*, diuji untuk mendapatkan data yang relevan tentang karakteristik korosinya. Hasil uji korosi tertera pada Tabel 5.

Laju korosi pada baja ASTM A36 meningkat seiring dengan peningkatan sudut pengelasan. Pada sudut 55 derajat, laju korosi rata-rata sebesar 0.24 mm/year untuk *base metal* (BM), 0.29 mm/year untuk *heat-affected zone* (HAZ), dan 0.36 mm/year untuk *weld metal* (WM). Pada sudut 65 derajat, laju korosi meningkat menjadi 0.46 mm/year untuk BM, 0.94 mm/year untuk HAZ, dan 1.66 mm/year untuk WM. Pada sudut 75 derajat, laju korosi mencapai rata-rata 0.54 mm/year untuk BM, 2.73 mm/year untuk HAZ, dan 6.55 mm/year untuk WM.

Peningkatan input panas pada proses pengelasan menyebabkan peningkatan tegangan sisa [9]. Tegangan sisa memiliki dampak signifikan pada laju korosi, di mana semakin tinggi tegangan sisa, semakin tinggi pula laju korosi yang terjadi. Pada daerah *weld metal* (tegangan sisa tarik) dan HAZ (tegangan sisa tekan), ditemukan peningkatan laju korosi seiring dengan peningkatan sudut pengelasan. Peningkatan sudut dari 55 derajat menjadi 65 derajat menyebabkan peningkatan laju korosi pada *weld metal* dari 0,36 mm/year menjadi 1,66 mm/year, dan pada HAZ dari 0,29 mm/year menjadi 0,94 mm/year. Selanjutnya, peningkatan sudut menjadi 75 derajat menghasilkan

peningkatan laju korosi yang lebih signifikan pada *weld metal* menjadi 6,55 mm/year dan pada HAZ menjadi 2,73 mm/year.

Peningkatan tegangan sisa pada sambungan las menyebabkan peningkatan energi dalam, energi rata-rata elektron, dan kekuatan ikatan dalam struktur logam. Selain itu, terjadi pengurangan energi aktivasi rata-rata yang diperlukan untuk transformasi atom logam menjadi ion logam. Dampak ini menyebabkan laju korosi meningkat karena percepatan laju transformasi dari atom logam menjadi ion logam akibat tegangan sisa [10]. Butir yang lebih besar cenderung mengurangi laju korosi dalam mekanisme korosi umum [11]. Namun, penelitian ini lebih menekankan pengaruh tegangan sisa terhadap laju korosi. Ditemukan bahwa batas butir dengan cacat lebih banyak cenderung lebih sensitif terhadap korosi intergranular karena perlindungan yang lebih lemah dalam larutan asam pereduksi [12]. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa laju korosi meningkat pada logam las dan HAZ ketika sudut *single V joint* meningkat karena peningkatan tegangan sisa terkait dengan volume pengisian logam las yang lebih besar.

Hasil pengujian korosi memberikan kesimpulan bahwa dengan semakin besar sudut *single V joint*, laju korosi meningkat karena peningkatan deposit bahan tambah yang mengisi volume kampuh, menyebabkan tegangan sisa lebih besar. Rata-rata corrosion rate tertera pada Gambar 5.

### C. Pengujian Tarik

Pengujian tarik adalah pengujian untuk mengevaluasi kekuatan dan keuletan sambungan las. Pengujian ini dibutuhkan dalam rangka penentuan material yang tepat dalam pembuatan konstruksi. Setelah dilakukan pengujian terhadap material ASTM A36 hasil pengelasan menggunakan variasi sudut kampuh *single V joint*, maka didapat data uji tarik tertera pada Tabel 6.

Hasil uji tarik menunjukkan patahan pada daerah *base metal*, tetapi patahan pada daerah *weld metal* tidak diikutsertakan dalam analisis rata-rata karena data menjadi tidak homogen. Patahan pada *base metal* menunjukkan kekuatan yang memadai untuk menahan tegangan tarik sebelum patah, menandakan pemilihan elektroda dan metode *multipass* dalam pengelasan yang tepat telah memberikan kontribusi pada kekuatan dan ketahanan sambungan terhadap beban tarik.

Data Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai *stress ultimate* mencapai titik optimum pada sudut *single V joint* 65 derajat dengan nilai 491.1 MPa, mengalami peningkatan sebesar 2.53% dari sudut 55 derajat (479 MPa). Namun, saat sudut mencapai 75 derajat, terjadi penurunan sebesar 3.76% dari nilai sebelumnya dengan rata-rata sebesar 472.63 MPa. Sedangkan, nilai *yield stress* menunjukkan bahwa sudut 55 derajat memiliki nilai optimum dengan 346.2 MPa, mengalami kenaikan sebesar 1.07% menjadi 349.9 MPa pada sudut 65 derajat, dan kenaikan sebesar 0.69% pada sudut 75 derajat dengan rata-rata sebesar 352.33 MPa.

Patahan pada *base metal* dalam uji tarik menunjukkan kesesuaian pemilihan elektroda dan penggunaan metode *multipass* pada proses pengelasan, menandakan peningkatan kekuatan pada logam las dan HAZ. Pada metode *multipass*, zona pengaruh panas dari pengelasan berikutnya dapat menggantikan zona fusi dari pengelasan sebelumnya, meningkatkan kekuatan logam las melalui peningkatan kepadatan butir dalam zona fusi yang kasar [3]. Pemilihan elektroda dan metode *multipass* yang tepat dapat mempengaruhi kekuatan tarik dan sifat mekanik material pada sudut *single V joint* yang berbeda, menyoroti pentingnya dalam mencapai kekuatan optimal dalam pengelasan dan uji tarik.

Perbedaan variasi data pada *base metal* disebabkan oleh ketidakpengaruhannya terhadap panas selama proses pengelasan. Fluktuasi data terjadi karena adanya anisotropi, dimana bahan menunjukkan respons mekanik yang berbeda ketika dikenakan gaya tarik dalam arah yang berbeda karena orientasi dan distribusi mikrostruktur bahan tidak seragam dalam semua arah.

Tabel 6 menunjukkan bahwa terdapat spesimen uji yang mengalami patahan pada daerah *weld metal* akibat porositas dan *slag inclusion*. Contoh kasus perhitungan *stress ultimate efektif* pada *single V joint* 55 derajat benda uji 2 menunjukkan luas sketsa dari aplikasi CorelDraw sebesar 2794.9 mm<sup>2</sup>. Terdapat 4 luas sketsa cacat las yang diidentifikasi, yaitu 24.9 mm<sup>2</sup>, 128.6 mm<sup>2</sup>, 26.3 mm<sup>2</sup>, dan 78.1 mm<sup>2</sup>. Total luas sketsa cacat las yang teridentifikasi adalah 257.9 mm<sup>2</sup>. Dengan pendekatan perbandingan, perkiraan luas cacat las yang sebenarnya adalah 13.3 mm<sup>2</sup> berdasarkan luasan sebenarnya (144 mm<sup>2</sup>). Data perhitungan *stress ultimate* tertera pada Tabel 7. Setelah memperoleh luas cacat las aktual, dilakukan perhitungan luas permukaan tanpa cacat las yang

berkontribusi pada nilai *stress ultimate* sebesar 427.7 MPa pada benda uji 2 *single V joint* dengan sudut 55 derajat. Luas permukaan tanpa cacat las dihitung dengan mengurangi luas cacat las aktual dari luas area aktual:

$$\begin{aligned} \text{Luas Tanpa Cacat Las} &= 144 \text{ mm}^2 - 13,3 \text{ mm}^2 \\ &= 130,7 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Selanjutnya, dilakukan perhitungan perbandingan force ultimate efektif berdasarkan luas permukaan tanpa cacat las:

$$\begin{aligned} \text{Force Ultimate Efektif} &= \frac{\text{Force Ultimate} \times \text{Area Efektif}}{\text{Luas Tanpa Cacat Las}} \\ &= \frac{6281 \text{ kgf} \times 144 \text{ mm}^2}{130,7 \text{ mm}^2} = 6919,5 \text{ kgf} \\ \text{Stress Ultimate Efektif} &= \frac{\text{Force Ultimate Efektif}}{\text{Area Efektif}} \\ \text{Stress Ultimate Efektif} &= \frac{6919,5 \text{ kgf}}{144 \text{ mm}^2} = 471,23 \text{ MPa} \end{aligned}$$

### D. Pengujian Metalografi

Pada penelitian ini, struktur mikro pada ketiga variabel didominasi oleh *ferrite* dan *pearlite*. Butir – butir ferit ditunjukkan dengan zona terang, sementara butir – butir perlit ditunjukkan dengan zona gelap.

Pada *weld metal*, terjadi peningkatan signifikan pada nilai *grain size area* pada sudut *single V joint* 55°, 65°, dan 75°, masing-masing dengan angka 178 μm<sup>2</sup>, 252 μm<sup>2</sup>, dan 356 μm<sup>2</sup> secara berturut-turut. Penyebabnya adalah peningkatan volume pengisian logam las dan masukan panas yang lebih besar akibat peningkatan sudut sambungan las. Semakin lambat kecepatan pengelasan, semakin tinggi masukan panas yang diterima oleh logam. Perhitungan *grain size area* tertera pada Tabel 8. Average *grain size area* tertera pada Gambar 7.

Di sisi lain, pada daerah *base metal*, perhitungan *grain size number* menunjukkan nilai konstan dengan *grain size area* sebesar 178 μm<sup>2</sup> pada setiap variasi sudut *single V joint*. Hal ini menunjukkan bahwa panas yang dihasilkan selama proses pengelasan tidak mempengaruhi daerah *base metal*. Namun, daerah HAZ cenderung mengalami peningkatan nilai *grain size area* pada setiap variasi sudut *single V joint* 55°, 65°, 75° dengan angka masing – masing sebesar 44.6 μm<sup>2</sup>, 63 μm<sup>2</sup> dan 89.1 μm<sup>2</sup>. Dampak dari masukan panas yang tinggi juga menyebabkan penurunan laju pendinginan, yang pada akhirnya dapat menyebabkan ukuran butiran yang lebih kasar di daerah *weld metal* dan HAZ jika suhu cukup tinggi untuk mendorong pertumbuhan butiran sebelum terjadinya transformasi.

Masukan panas yang tinggi menyebabkan adanya penurunan laju pendinginan, yang pada gilirannya dapat menyebabkan ukuran butiran yang kasar di daerah *weld metal* dan HAZ jika suhu cukup tinggi untuk mendorong pertumbuhan butiran sebelum terjadinya transformasi [13].

## V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan penelitian pengaruh sudut *single V joint* terhadap laju korosi, kekuatan tarik dan struktur mikro pelat baja A36 dengan pengelasan SMAW menggunakan elektroda E7018 pada lingkungan laut, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut laju korosi meningkat seiring dengan peningkatan sudut *single V joint*. *Base metal* memiliki laju

korosi terendah, sedangkan *weld metal* memiliki laju korosi tertinggi dalam larutan korosif NaCl 3,5%. Laju korosi pada daerah logam las pada sudut *single V joint* 55°, 65°, dan 75° adalah 0,36 mm/year, 1,66 mm/year, dan 6,55 mm/year secara berturut-turut.

Peningkatan variasi sudut pada sambungan las *single V joint* tidak mempengaruhi hasil uji tarik karena patahan terjadi di *base metal*, menunjukkan bahwa pemilihan elektroda dan metode *multipass* dalam proses pengelasan sesuai. Fluktuasi nilai uji tarik dengan patahan di *base metal* menunjukkan adanya anisotropi dalam respons mekanik bahan pada arah tarik yang berbeda. Beberapa spesimen juga mengalami patahan pada daerah *weld metal* karena adanya porositas dan *slag inclusions*.

Variasi sudut *single V joint* menyebabkan transformasi ukuran butir mikro pada HAZ dan *weld metal*. Semakin besar sudut, semakin besar volume pengisian logam las yang menyebabkan peningkatan ukuran butiran pada HAZ dan *weld metal*. Namun, tidak ditemukan transformasi fasa dalam seluruh variasi sudut *single V joint*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. W. Messle, *Principles of Welding Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. ISBN: 9780471253761.
- [2] M. Khan, *Welding Science and Technology*. New Delhi: New Age International, 2007. ISBN: 9788122420739.
- [3] S. Kou, *Welding Metallurgy*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. ISBN: 9781119524915.
- [4] H. Wiryosumarto and T. Okumura, *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita, 2000. ISBN: 9789794081754.
- [5] M. Fontana, N. Greene, and J. Klerer, "Corrosion engineering," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 115, no. 5, p. 142C, 1968.
- [6] R. H. Jones and R. Ricker, "Mechanisms of Stress-Corrosion Cracking," in *Stress-Corrosion Cracking Materials Performance and Evaluation*, Almere: ASM International, 2017. ISBN: 978-1-62708-266-2.
- [7] A. Khalifeh, "Stress Corrosion Cracking Damages," in *Failure Analysis*, Langfang: IntechOpen, 2019. ISBN: 9781483193779.
- [8] X. Zhang, S. Wang, X. a Wang, Z. Cui, H. a Cui, and Y. Li, "The stress corrosion cracking behavior of n80 carbon steel under a crevice in an acidic solution containing different concentrations of nacl," *Corros. Sci.*, vol. 216, 2023.
- [9] C. C. Silva, J. T. de Assis, S. Philippov, and J. P. Farias, "Residual stress, microstructure and hardness of thin-walled low-carbon steel pipes welded manually," *Mater. Res.*, vol. 19, pp. 1215--1225, 2016.
- [10] L. Bai, K. Jiang, and L. Gao, "The influence and mechanism of residual stress on the corrosion behavior of welded structures," *Mater. Sci.*, vol. 21, 2018.
- [11] M. Soleimani, H. Mirzadeh, and C. Dehghanian, "Effect of grain size on the corrosion resistance of low carbon steel," *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 1, p. 016522, 2020.
- [12] B. Shang, L. Lei, X. Wang, P. He, X. Yuan, and W. Dai, "Effects of grain boundary characteristics changing with cold rolling deformation on intergranular," *Corros. Sci.*, vol. 8, pp. 27--39, 2022.
- [13] N. Fang, E. Guo, R. Huang, L. Yin, and Y. Chen, "Effect of welding heat input on microstructure and properties of coarse grain zone in heat affected zone of ultra-low carbon bainitic," *Mater. Res. Express*, vol. 8, no. 1, p. 016511, 2021.