



## Analisis Pengaruh Variasi Elektroda Las dan Posisi Pengelasan terhadap Kekuatan Tarik dan Impak Sambungan Las *Dissimilar* Baja ST 42 dan *Stainless Steel* SS304

Adhitiya Putera Setiawan<sup>1)</sup>, Parlindungan Manik<sup>1)</sup> Untung Budiarto<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Laboratorium Teknologi Material, Las, dan Produksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

<sup>\*)</sup>e-mail: [adhitiya.pst@gmail.com](mailto:adhitiya.pst@gmail.com), [parlindunganmanik@lecturer.undip.ac.id](mailto:parlindunganmanik@lecturer.undip.ac.id), [untungbudiarto@lecturer.undip.ac.id](mailto:untungbudiarto@lecturer.undip.ac.id)

### Abstrak

Perbedaan sifat fisik dan kimia yang signifikan pada penyambungan logam tak sejenis antara baja karbon ST 42 dan stainless steel SS304 menuntut pemilihan parameter pengelasan yang presisi guna mencegah kegagalan struktural yang krusial dalam aplikasi industri perkapalan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi elektroda SMAW tipe E309L dan E312 serta posisi pengelasan 2G dan 3G terhadap kekuatan mekanis sambungan. Evaluasi kualitas sambungan dilakukan melalui pengujian kekuatan tarik yang mengacu pada standar ASTM E8 dan pengujian ketangguhan impak berdasarkan standar ASTM E23. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa variasi elektroda E309L pada posisi 2G menghasilkan kekuatan tarik rata-rata tertinggi sebesar 458.88 MPa, atau unggul sekitar 10 persen dibandingkan variasi terendah yang dihasilkan oleh elektroda E312 pada posisi yang sama. Selain itu, elektroda E312 pada posisi 3G menunjukkan nilai kekuatan tarik yang sedikit lebih tinggi, sekitar 2 persen, dibandingkan posisi 2G. Pada pengujian impak, variasi 2G dengan E309L menghasilkan nilai tertinggi di antara sambungan las sebesar 1.4 Joule per milimeter persegi, namun nilai ini mengalami penurunan jika dibandingkan dengan material dasar Stainless Steel SS304, meskipun mengalami peningkatan dibandingkan material dasar Baja ST 42. Variasi 3G dengan E309L justru mencatatkan nilai impak terendah sebesar 1.00 Joule per milimeter persegi. Disimpulkan bahwa elektroda E309L pada posisi 2G memberikan kombinasi sifat mekanis yang paling optimal dalam penelitian ini.

Kata Kunci : Pengelasan *Dissimilar*, SMAW, Kekuatan Mekanis, Baja ST 42, *Stainless Steel* SS304

### 1. PENDAHULUAN

Penyambungan logam *dissimilar*, khususnya antara baja ST 42 dan stainless steel SS304, memegang peranan esensial dalam berbagai sektor industri, termasuk perkapalan. Tantangan fundamental dalam proses ini bersumber dari perbedaan pada sifat fisik, kimia, dan termal dari kedua material tersebut. Kondisi ini berpotensi mengkompromikan kualitas sambungan, memicu cacat seperti keretakan atau deformasi, yang pada akhirnya mengurangi kekuatan mekanisnya[1].

Jenis elektroda dan posisi pengelasan diidentifikasi sebagai dua faktor dengan pengaruh dominan di antara berbagai parameter.. Pemilihan elektroda menentukan transfer elemen paduan dan metalurgi las, sementara posisi pengelasan mengatur dinamika masukan panas dan solidifikasi

logam cair. Keduanya berdampak langsung pada integritas mikrostruktur dan ketiadaan cacat pada sambungan akhir las.[2]

Sebagai contoh, penelitian oleh Alfahmi et al.[3] menganalisis kekuatan impak sambungan *dissimilar* (Baja Karbon AISI 1050 dan SS 304) menggunakan elektroda E309 dengan variasi arus. Temuan mereka menunjukkan bahwa kekuatan impak rata-rata untuk arus 80 A adalah 3.44 J/mm<sup>2</sup>, sedangkan untuk arus 95 A adalah 3.54 J/mm<sup>2</sup>. Kedua hasil lasan ini lebih tinggi dari material dasar (tanpa las) yang hanya 3.2 J/mm<sup>2</sup>. Para peneliti menyimpulkan bahwa arus 95 A menghasilkan ketahanan impak yang lebih baik karena panas yang lebih tinggi membantu filler elektroda menyatu lebih baik ke dalam sambungan.

Studi lain oleh Azis et al.[4] menginvestigasi dampak dari variasi diameter elektroda E7018

terhadap kekuatan tarik pada baja karbon rendah SS400. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kekuatan tarik cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya diameter elektroda, di mana diameter 4,0 mm menghasilkan kekuatan tarik tertinggi (471,11 MPa) dibandingkan dengan diameter 3,2 mm (470,15 MPa) dan 2,6 mm (462,42 MPa).

Penelitian lainnya berfokus pada dampak posisi pengelasan. Studi oleh Nurcholis et al.[5] melakukan analisis komparatif mengenai bagaimana berbagai posisi pengelasan (1G, 2G, 3G) memengaruhi kekerasan pada sambungan dissimilar (SUS 304 dan SS 400). Temuan mereka menunjukkan bahwa posisi 3G menghasilkan nilai kekerasan tertinggi di area weld metal (207,17 HVN), sementara posisi 2G menunjukkan nilai kekerasan terendah (195,13 HVN).

Gumilar et al.[6] juga berkontribusi dengan menganalisis mikrostruktur dan kekerasan pada sambungan dissimilar (AISI 1018 dan AISI 304). Penelitian tersebut menemukan bahwa proses pengelasan menyebabkan penurunan nilai kekerasan di area HAZ pada kedua sisi material, yang diatribusikan pada terjadinya pembesaran butir (grain enlargement), khususnya pada fasa austenit di sisi AISI 304.

Penelitian lain yang juga menggunakan material dasar ST 42 dan SS 304 dilakukan oleh Lobo[7]. Studi ini berfokus pada perbandingan elektroda E 7018 dan E 308-16 (diameter 2.6 mm) dengan variasi arus (70 A, 80 A, 90 A). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sambungan dissimilar terbaik diperoleh dari elektroda E 308 (yang sejenis dengan E309L) pada arus 70 A. Data uji tarik spesifik untuk elektroda E 308 pada arus 70 A menunjukkan nilai kekuatan tarik rata-rata sebesar 38.934 kgf/mm<sup>2</sup> (sekitar 381.8 MPa). Temuan ini juga mengonfirmasi bahwa patahan spesimen uji tarik secara konsisten terjadi pada material dasar ST 37 (yang setara dengan ST 42), bukan pada logam lasnya.

Secara lebih spesifik, penelitian yang sangat relevan dengan material dasar yang sama (AISI 304 dan ST42) telah dilakukan oleh Setiawan & Rosidah [8]. Mereka menginvestigasi pengaruh posisi pengelasan (1G, 2G, 3G) dan variasi diameter elektroda (2 mm, 2.6 mm, 3.2 mm) menggunakan elektroda E6013. Temuan mereka menunjukkan bahwa posisi pengelasan 2G dengan diameter 3.2 mm menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, yaitu sebesar 391,92 N/mm<sup>2</sup> (MPa). Sebaliknya, posisi 3G dengan diameter 2 mm menghasilkan kekuatan tarik terendah, yaitu 230,83 N/mm<sup>2</sup> (MPa). Penelitian ini juga mengonfirmasi bahwa posisi 3G cenderung menghasilkan lebar HAZ terbesar (0,58 mm),

sementara posisi 2G menghasilkan HAZ yang lebih kecil (0,53 mm) pada diameter elektroda yang sama (3.2 mm).

Meskipun penelitian-penelitian tersebut memberikan wawasan berharga, mayoritas cenderung berfokus pada salah satu variabel saja, baik jenis elektroda, diameter elektroda, kuat arus pengelasan, atau posisi pengelasan secara terpisah. Masih terdapat celah pengetahuan mengenai bagaimana interaksi antara variasi jenis elektroda dan posisi pengelasan mempengaruhi sifat mekanik, khususnya kekuatan tarik dan dampak, pada sambungan spesifik antara baja ST 42 dan SS304. Inilah celah pengetahuan yang menjadi justifikasi utama penelitian ini.

Justifikasi tersebut melandasi penelitian ini, yang dirancang untuk mengevaluasi secara sistematis dampak kombinasi dari variasi elektroda dan posisi pengelasan terhadap kekuatan tarik dan ketangguhan dampak pada sambungan las dissimilar antara baja ST 42 dan stainless steel SS304. Luaran dari studi ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis berbasis bukti untuk menentukan parameter pengelasan yang paling baik, yang sangat penting untuk meningkatkan keandalan struktur pada aplikasi industri.

## 2. METODE

### 2.1. Pengumpulan Data

Metode eksperimental adalah metode yang digunakan untuk mendapatkan temuan dalam penelitian ini,. Pendekatan tersebut mencakup beberapa tahapan berurutan, yang diawali dengan persiapan sampel uji, diikuti oleh proses pengelasan sampel menggunakan metode SMAW, dan diakhiri dengan pelaksanaan pengujian tarik serta pengujian dampak terhadap sampel tersebut.

Baja ST 42 ini dikenal karena kekuatan tariknya yang baik, kemampuannya untuk menanggung beban berat, serta ketahanannya terhadap gaya dan tekanan. Baja ST 42 memiliki beberapa spesifikasi yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Mekanik Baja ST 42

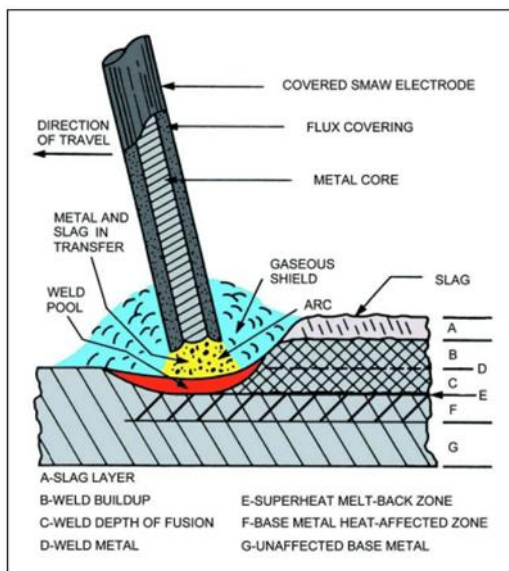
<i>Mechanical Properties</i>	<i>Nilai</i>
<i>Tensile Strength</i>	410 – 490 MPa
<i>Poissons Ratio</i>	0.29
<i>Elongation</i>	≥ 22%
Modulus Elastisitas	210 Gpa

*Stainless steel* SS304 dikenal dengan ketahanan korosi yang sangat baik, kekuatan

mekanik yang solid, dan kemampuan untuk mempertahankan integritas struktural di berbagai kondisi lingkungan. Material ini sangat cocok untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan terhadap kelembaban dan bahan kimia. *Stainless steel* SS304 memiliki berbagai spesifikasi material yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Mechanical Properties	Nilai
Tensile Strength	510 – 620 MPa
Poissons Ratio	0,29
Elongation	40 – 70 %
Modulus Elastisitas	193 - 200 GPa

Pengelasan batang atau *Stick Welding*, yang secara teknis dikenal sebagai SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), merupakan metode yang sangat umum digunakan. Popularitasnya didasari oleh kepraktisannya, kemudahan pengoperasian di segala posisi, serta efisiensi biaya. Proses ini bekerja dengan memanfaatkan elektroda terbungkus yang habis pakai; inti logam elektroda tersebut akan meleleh dan menjadi material pengisi sambungan las. Panas yang intens dari busur listrik, yang terbentuk antara ujung elektroda dan logam dasar, akan meleburkan keduanya secara bersamaan. Metode SMAW ini dapat diaplikasikan pada hampir semua jenis material karena kesederhanaan dan biayanya yang terjangkau[9].



Gambar 1. Pengelasan SMAW

Metode SMAW bekerja dengan memanfaatkan rangkaian listrik yang mengubah daya listrik menjadi energi panas untuk

menciptakan busur las. Busur ini menghasilkan panas yang sangat terkonsentrasi dan intens, yang berfungsi untuk melelehkan ujung elektroda serta sebagian logam dasar secara bersamaan. Juru las menjaga panjang busur dengan cara mengatur jarak atau gap antara elektroda dan kolam lasan pada benda kerja secara konsisten. Ketika busur dihilangkan, cairan menyatu dan membeku menjadi padatan berbentuk logam yang kontinu.

Posisi pengelasan dalam pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) memiliki dampak yang signifikan terhadap berbagai aspek proses pengelasan, termasuk kualitas, efisiensi, kesulitan, dan keamanan. Setiap posisi pengelasan memiliki tantangan dan karakteristiknya sendiri yang memerlukan keterampilan dan teknik khusus dari pengelas untuk menghasilkan lasan yang berkualitas tinggi[10].

Penggunaan elektroda dalam proses pengelasan SMAW memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas, efisiensi, dan keseluruhan keberhasilan proses. Elektroda dipilih berdasarkan komposisi kimianya yang harus sesuai dengan logam dasar untuk memastikan kekuatan dan kecocokan material yang dilas. Elektroda juga mempengaruhi penetrasi lasan, dimana elektroda dengan penetrasi dalam cocok untuk pengelasan material tebal sementara yang dangkal lebih cocok untuk material tipis[11].

Sifat mekanis utama, yang meliputi kekuatan tarik, regangan, dan modulus elastisitas, ditentukan melalui pengujian tarik. Prosedur ini melibatkan pemasangan spesimen pada mesin Universal Testing Machine (UTM), yang kemudian memberikan pembebanan secara bertahap dengan laju konstan hingga spesimen mengalami kegagalan (patah). Keseluruhan metodologi pengujian ini dilaksanakan dengan mengacu pada standar internasional ASTM E8[12-13].

Beberapa sifat yang diperoleh dari pengujian tarik:

1. Tegangan tarik maksimum ( $\sigma$ )

Teganga tarik didefinisikan sebagai tegangan maksimum yang dapat diterima oleh suatu material sebelum material itu patah. Sebagai contoh, rumus untuk menghitung kekuatan tarik adalah:

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

- A : Luas penampang ( $m^2$ )
- F : Gaya (N)
- $\sigma$  : Tegangan ( $N/m^2$  atau Pa)

2. Regangan maksimum

Regangan maksimum sebuah material didefinisikan sebagai panjang yang bertambah setelah patahan terhadap panjang awalnya.

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

e : Regangan (%)  
 $\Delta L$  : Pertambahan Panjang (m)  
 $L_0$  : Panjang Awal (m)

### 3. Modulus elastisitas

Modulus elastisitas atau biasa disebut modulus young adalah ukuran kekuatan pada sebuah material.

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad (3)$$

E : Modulus Elastisitas (GPa)  
 $\sigma$  : Tegangan pada Yield (MPa)  
e : Regangan pada Yield (%)

Proses pengujian impak pengelasan melibatkan penggunaan alat uji impak untuk memberikan energi pada sampel pengelasan. Ketika sampel terpukul, hasil uji mengukur jumlah energi yang diperlukan agar sampel patah, memberikan indikasi tentang ketangguhan sambungan las. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi kualitas sambungan las, memastikan sesuai dengan standar, dan memberikan informasi untuk perbaikan jika diperlukan[14].

Uji Charpy adalah salah satu metode yang paling umum digunakan untuk mengukur kekuatan impak. Uji ini menggunakan sebuah spesimen material ditempatkan dalam posisi tertentu dan dipukul oleh sebuah *hammer* yang digerakkan oleh gravitasi. Energi yang diserap oleh spesimen selama benturan diukur dan digunakan untuk menilai ketahanan impak material. Uji Charpy dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$HI = \frac{E}{A} \quad (4)$$

HI : Nilai Kuat Impak (J/mm<sup>2</sup>,)  
E : Usaha Untuk Mematahkan (J)  
A : Luas Penampang (mm<sup>2</sup>)

## 2.2. Tahap Penelitian

Penelitian ini mencakup beberapa tahap, antara lain:

### A. Pengumpulan Bahan

Penelitian ini menggunakan Baja Karbon Rendah ST 42 dan *Stainless Steel SS304* dengan dimensi ukuran kedua plat yaitu 410 mm x 205 mm x 5 mm untuk spesimen uji tarik dan 180 mm x 60

mm x 10 mm untuk spesimen uji impak sebanyak masing-masing satu lembar plat.

### B. Pemotongan dan Pengelasan Plat

Pengelasan spesimen dimulai dengan memotong kedua jenis material masing-masing menjadi ukuran 410 mm x 102,5 mm x 5 mm untuk spesimen uji tarik dan 180 mm x 30 mm x 10 mm untuk spesimen uji impak sehingga menghasilkan total empat buah plat pada tiap jenis material, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



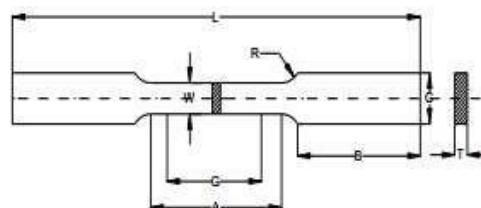
Gambar 2. Potongan Baja ST 42 dan SS304

Proses selanjutnya dilakukan pengelasan dengan 2 variasi posisi pengelasan 2G dan 3G, dengan 2 variasi elektroda E309-L dan E312. Pengelasan dilakukan menggunakan metode SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) di *workshop* LKP Inlastek Welding Institute Surakarta dengan detail sebagai berikut.

- Mesin Las : Multi Pro 250 A
- Jenis Elektroda : E309-L dan E312
- Diameter Elektroda: 2,6 mm
- Kuat Arus (I) : 45-85 A
- Kecepatan Las : 2,75 mm/s
- Tegangan (E) : 20-30 V
- Posisi Pengelasan : 2G dan 3G
- Heat Input : 0,67 kJ/mm untuk 2G  
0.75 kJ/mm untuk 3G

### C. Pembuatan Spesimen

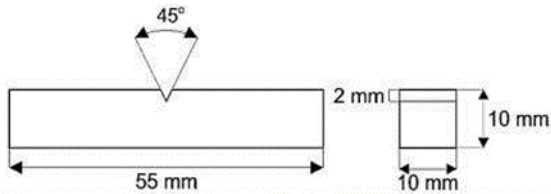
Material yang sudah dilas kemudian dipotong sesuai dengan standar ASTM E8 (untuk uji tarik) dan ASTM E23 (untuk uji impak). Standar yang dimaksud ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Dimensi Spesimen Uji Tarik

Keterangan:

- Gage length (G) : 50 mm
- Radius of fillet (R) : 12,5 mm
- Length of reduced section (A) : 57 mm
- Overall length (L) : 200 mm
- Width (W) : 12,5 mm
- Width of grip section (C) : 20 mm
- Thickness (T) : 5 mm
- Length of grip section (B) : 50 mm



Gambar 4. Dimensi Spesimen Uji Impak

Keterangan:

- Overall Length (L) : 55 mm
- Width (W) : 10 mm
- Thickness (T) : 10 mm
- Notch Thickness. : 2 mm
- Notched Charpy : 45°



Gambar 5. Spesimen Uji Tarik dan Impak

#### D. Proses Pengujian

Tahap pengujian tarik dan impak dilakukan di Laboratorium Material Teknik Mesin Universitas Diponegoro (UNDIP), Semarang.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil Uji Tarik

Pengujian tarik dilaksanakan dengan mengacu pada standar ASTM E8, diawali dengan menjepit spesimen uji pada kedua sumpunya, lalu memberikan gaya statis yang ditingkatkan secara bertahap hingga spesimen mengalami patah (*ruptur*). Pengujian ini dikategorikan sebagai *destructive test* atau uji merusak, karena menyebabkan spesimen uji rusak permanen dan tidak dapat digunakan kembali. Beberapa contoh

spesimen yang telah patah setelah melalui proses ini diperlihatkan pada Gambar 6.



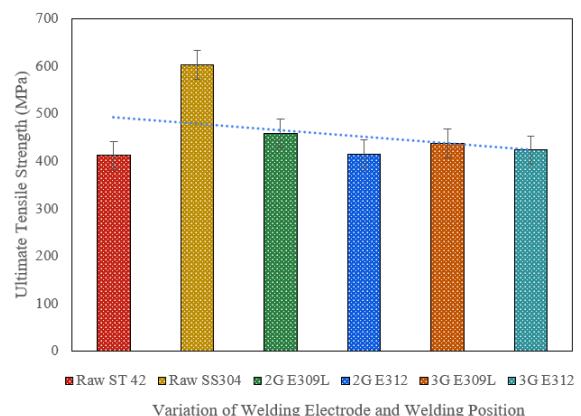
Gambar 6. Spesimen Hasil Uji Tarik

#### 1. Tegangan Tarik

Kekuatan tarik adalah batas tegangan tertinggi yang dapat ditahan oleh sebuah material sebelum akhirnya patah atau hancur. Hasil pengujian pada 16 spesimen material tercantum pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Tegangan Tarik

Variasi	Area (mm)	P max (KN)	$\sigma$ Max (MPa)	$\sigma$ Rata-rata (MPa)	Posisi Patah	Standar Deviasi
Raw ST 42	62.5	25.74	411.99	411.99	-	-
Raw SS304	62.5	37.50	600.03	600.03	-	-
2G dan E309L	62.5	29.22	467.49	458.88	Baja ST 42	7.61
	62.5	28.16	450.56			
	62.5	28.43	454.88			
	62.5	28.91	462.56			
2G dan E312	62.5	25.72	411.52	415.08	Baja ST 42	3.27
	62.5	26.02	416.33			
	62.5	26.38	422.08			
	62.5	25.66	410.56			
3G dan E309L	62.5	27.58	441.28	437.37	Baja ST 42	5.27
	62.5	27.19	435.04			
	62.5	27.42	438.72			
	62.5	27.14	434.24			
3G dan E312	62.5	26.41	422.56	423.47	Baja ST 42	5.89
	62.5	26.16	418.57			
	62.5	26.99	431.97			
	62.5	26.29	420.77			



Gambar 7. Nilai Tegangan Tarik

Hasil analisis pada Gambar 7 mengindikasikan bahwa variasi 2G dan E309L memiliki performa paling unggul, dengan nilai tegangan tarik rata-rata mencapai 458.88 MPa. Nilai ini melampaui, kekuatan tarik *raw* material ST 42 yang terukur sebesar 411.99 MPa. Semua hasil sambungan las masih berada jauh di bawah kekuatan tarik minimum *raw* material SS304 (600.03 MPa), yang secara jelas menunjukkan bahwa baja ST 42 menjadi bagian terlemah dalam sambungan las *dissimilar* ini dan membatasi kekuatan tarik spesimen.

Perbedaan nilai kekuatan tarik antara E309L dan E312 dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui pengaruh dilusi pada logam las. Elektroda E312 memiliki kandungan Cr dan *ferrite* yang lebih tinggi, sehingga sifat mekaniknya sangat sensitif terhadap perubahan komposisi akibat pencampuran logam dasar selama pengelasan. Ketika dilakukan pengelasan *dissimilar* ST42 dan SS304, pencampuran unsur dari baja karbon dapat mengubah fasa mikro pada elektroda E312 dan menurunkan kekuatannya. Inoue et al.[15] melaporkan bahwa peningkatan dilusi pada pengelasan *stainless steel* dengan *filler* tipe Ni-base dapat menyebabkan perubahan inklusi dan pembentukan fasa rapuh seperti Laves, sehingga menurunkan stabilitas mekanik sambungan. Temuan tersebut mendukung hasil penelitian ini, yaitu bahwa E309L yang lebih stabil terhadap dilusi memberikan kekuatan tarik lebih tinggi dibanding E312. Keunggulan ini kembali didukung dengan data pabrikan Hyundai[16] yang menunjukkan bahwa E309L memiliki struktur austenitik yang lebih stabil dan lebih tahan terhadap *hot cracking*.

Sebuah temuan menarik adalah pada elektroda E312, posisi 3G (423.47 MPa) justru menunjukkan kekuatan yang sedikit lebih tinggi daripada posisi 2G (415.08 MPa). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kualitas fusi; teknik hasil *weaving* pada posisi 3G dengan *heat input* yang lebih tinggi ternyata lebih efektif dalam menciptakan fusi yang matang dan solid untuk elektroda E312 yang sensitif, dibandingkan teknik *stringer* pada 2G yang mungkin menghasilkan fusi kurang optimal.

Penelitian sebelumnya[8] mencatat pengujian tarik pada pelat baja ST 42 dan SS304 menggunakan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) dengan elektroda E7018 pada posisi 2G dan 3G menunjukkan bahwa tegangan tarik pada elektroda berdiameter 2.6 mm dengan posisi 2G mendapat hasil tegangan tarik yang lebih baik dibandingkan posisi 3G dengan diameter yang sama. Penelitian tersebut mencatat nilai tegangan tarik untuk posisi 2G sekitar 302 MPa dan untuk

posisi 3G sekitar 276 MPa (mengacu pada grafik dalam penelitian tersebut), meskipun interaksi spesifik dengan elektroda E312 menunjukkan anomali yang logis. Temuan ini memperkuat prinsip bahwa kekuatan sambungan las tertinggi dicapai melalui sinergi antara proses pengelasan yang paling stabil (posisi 2G) dengan material las yang paling toleran (elektroda E309L), namun performa material yang sensitif seperti E312 sangat dipengaruhi oleh kecocokan teknik las dalam menghasilkan fusi yang baik.

*BKI Rules for Materials (Volume II)* membahas elektroda SMAW yang digunakan pada struktur kapal umumnya harus memiliki kekuatan tarik minimal sekitar 400 MPa, terutama untuk struktur baja karbon dan baja paduan yang termasuk kategori *hull structure*. Pada penelitian ini, elektroda E309L memenuhi persyaratan tersebut dengan nilai kekuatan tarik sebesar 458.88 MPa pada posisi 2G dan 437.37 MPa pada posisi 3G, sedangkan E312 menghasilkan nilai yang lebih rendah dan berada di bawah batas aman yang direkomendasikan BKI. Selain itu, *BKI Rules for Welding* mewajibkan kontrol terhadap dilution pada pengelasan *dissimilar* untuk menghindari terbentuknya fasa intermetalik getas. Temuan penelitian ini sejalan dengan laporan Inoue et al.[15] yang menyatakan bahwa peningkatan dilusi pada pengelasan *dissimilar* dapat memicu terbentuknya fasa Laves yang getas dan menurunkan kekuatan tarik. Hal ini menjelaskan mengapa E312 dalam penelitian ini menunjukkan performa mekanik yang kurang stabil dibandingkan E309L.

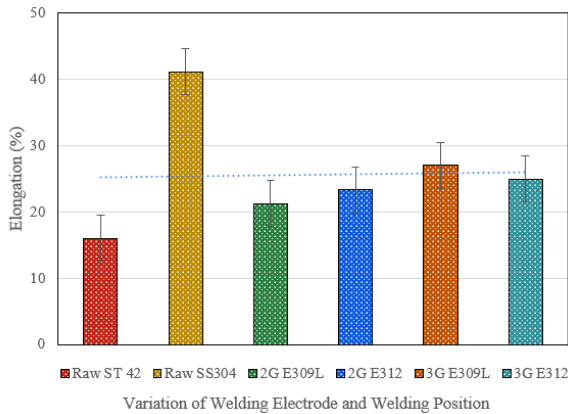
## 2. Regangan Tarik

Hasil pengujian spesimen menunjukkan nilai regangan tarik rata-rata seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Regangan Tarik

Spesimen	$\Delta L$ (mm)	Lo (mm)	Regangan (%)	Regangan rata-rata (%)
Raw ST 42	8.33	50	16.66	16.66
Raw SS304	20.53	50	41.07	41.07
2G dan E309L	9.94	50	19.88	21.2
	6.72	50	13.44	
	13.67	50	27.35	
	12.05	50	24.11	
2G dan E312	10.73	50	21.47	23.32
	13.21	50	26.43	
	11.41	50	22.83	
	11.27	50	22.55	

	14.67	50	29.34	
3G dan	12.68	50	25.37	26.97
E309L	13.11	50	26.23	
	13.46	50	26.93	
	11.45	50	22.91	
3G dan	11.9	50	23.8	24.93
E312	13.16	50	26.32	
	13.34	50	26.69	



Gambar 8. Nilai Regangan Tarik

Data hasil pengujian yang disajikan dalam Tabel 4 dan Gambar 8 menunjukkan bahwa rata-rata regangan tarik tertinggi dicapai oleh spesimen kombinasi 3G dan E309L dengan nilai 26.97%. Sebaliknya, rata-rata regangan tarik terendah ditemukan pada spesimen kombinasi 2G dan E309L dengan nilai 21.2%. Sementara itu, spesimen lainnya mencatatkan nilai rata-rata regangan tarik sebesar 23.32% (2G dan E312) dan 24.93% (3G dan E312). Semua nilai regangan hasil pengelasan ini lebih rendah daripada nilai regangan material raw SS304 (41.07%) namun berada di atas regangan material raw baja ST 42 (16.66%). Hal ini mengindikasikan bahwa kekuatan regang seluruh spesimen sambungan las dibatasi oleh sifat material baja ST42.

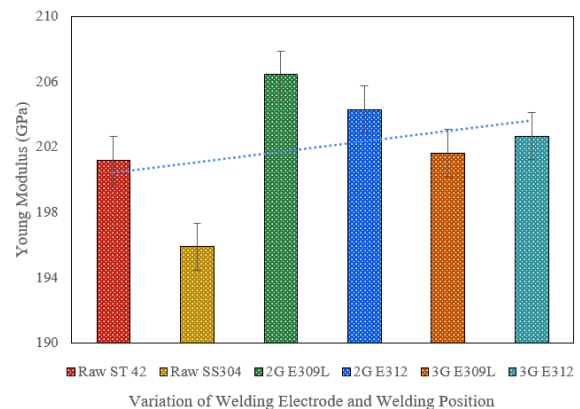
### 3. Modulus Elastisitas

Hasil pengujian menunjukkan nilai modulus elastisitas yang telah disajikan dalam Tabel 5 dan Gambar 9.

Tabel 5. Modulus Elastisitas

Spesimen	$\sigma$ Yield (MPa)	$\epsilon$ Yield (%)	E (GPa)	E rata-rata (GPa)
Raw ST 42	349.53	0.17	201.18	201.18
Raw SS304	216.36	0.11	195.89	195.89
	376.70	0.18	205.80	
	385.47	0.19	204.77	206.42

2G dan	371.34	0.18	208.04	
E309L	366.59	0.18	207.08	
	320.83	0.16	203.78	
2G dan	324.36	0.16	205.71	204.29
E312	330.15	0.16	204.02	
	335.13	0.16	203.68	
	342.47	0.17	201.87	
3G dan	350.66	0.17	201.41	201.61
E309L	342.80	0.17	201.34	
	355.52	0.18	201.84	
	343.22	0.17	202.88	
3G dan	339.97	0.17	203.52	202.66
E312	350.52	0.18	200.25	
	332.29	0.16	203.98	

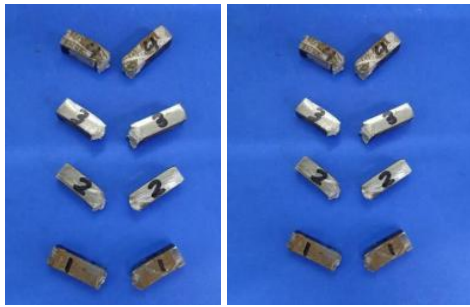


Gambar 9. Nilai Modulus Elastisitas

Data hasil pengujian yang disajikan dalam Tabel 5 dan Gambar 9 menunjukkan bahwa rata-rata modulus elastisitas tertinggi dicapai oleh spesimen kombinasi 2G dan E309L dengan nilai 206.42 GPa. Sebaliknya, rata-rata modulus elastisitas terendah ditemukan pada spesimen kombinasi 3G dan E309L dengan nilai 201.61 GPa. Sementara itu, spesimen lainnya mencatatkan nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 204.29 GPa (2G dan E312) dan 202.26 (3G dan E312). Semua nilai modulus elastisitas spesimen berada dalam rentang yang dekat dengan nilai standar kedua material raw ST 42 (201.18 GPa) dan SS304 (195.89 GPa). Hal ini menjelaskan bahwa nilai kekakuan (*stiffness*) spesimen tidak terpengaruh secara signifikan oleh variasi elektroda maupun posisi pengelasan dalam penelitian ini, dan nilainya sesuai dengan ekspektasi teoretisnya.

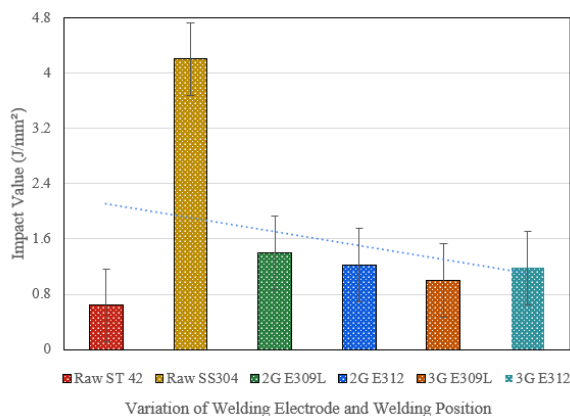
### 3.2. Hasil Uji Impak

Pengujian impak *charpy* dilakukan untuk mengukur nilai ketangguhan sambungan las dissimilar baja ST 42 dan SS304, yaitu kemampuannya menyerap energi beban kejut. Prosedur pengujian mengacu pada standar ASTM E23[17] dan diterapkan pada seluruh variasi spesimen, meliputi elektroda E309L dan E312 serta posisi pengelasan 2G dan 3G.



Gambar 10. Spesimen Setelah Pengujian Impak  
Tabel 6. Nilai Impak

Spesimen	Energi Terserap (J)	Luas (mm <sup>2</sup> )	Nilai Impak (J/mm <sup>2</sup> )	Nilai Impak Rata-Rata (J/mm <sup>2</sup> )
Raw ST 42	48.58	75	0.64	0.64
Raw SS304	327.88	78	4.20	4.20
2G dan E309L	112.04	80.8	1.39	1.40
	112.72	80.8	1.40	
	127.51	89.61	1.42	
	117.76	83.2	1.42	
2G dan E312	104.48	81.9	1.28	1.22
	103.12	84.8	1.22	
	107.91	89.04	1.21	
	109.11	90.3	1.21	
3G dan E309L	88.65	81.6	1.09	1
	80.63	78.78	1.02	
	74.75	85.6	0.87	
	88.65	86.4	1.03	
3G dan E312	92.33	77.77	1.18	1.18
	105.79	83.74	1.26	
	90.45	81.9	1.1	
	95.12	79.8	1.19	



Gambar 11. Nilai Impak

Berdasarkan hasil pengujian impak yang telah dilakukan, dapat diidentifikasi nilai serta perbandingan ketangguhan dari tiap spesimen pada Tabel 6. Data ini juga mencakup nilai impak dari

material dasar (*raw*), yaitu baja ST 42 (0.64 J/mm<sup>2</sup>) dan SS304 (4.20 J/mm<sup>2</sup>), yang berfungsi sebagai *baseline*. Secara keseluruhan, nilai rata-rata harga impak tertinggi diperoleh pada spesimen 2G dan E309L dengan rata-rata nilai impak sebesar 1.40 J/mm<sup>2</sup>. Semua hasil pengelasan menunjukkan ketangguhan impak yang lebih tinggi daripada nilai *raw* material baja ST42, namun masih jauh di bawah nilai *raw* material SS304. Sementara itu, rata-rata nilai impak terendah terdapat pada spesimen 3G dan E309L dengan nilai rata-rata 1.00 J/mm<sup>2</sup>. Peringkat selanjutnya, yaitu rata-rata nilai impak tertinggi kedua dan ketiga, secara berurutan ditunjukkan oleh spesimen 2G dan E312 dengan 1.22 J/mm<sup>2</sup> dan 3G dan E312 dengan 1.18 J/mm<sup>2</sup>.

Temuan yang menarik dari pengujian impak ini adalah nilai ketangguhan terendah justru diperoleh pada spesimen 3G dan E309L (rata-rata 1.00 J/mm<sup>2</sup>), meskipun secara teoretis elektroda E309L seharusnya lebih tangguh dibandingkan dengan elektroda E312. Penurunan ini sejalan dengan temuan Hu et al.[19] yang menyatakan bahwa peningkatan *heat input* menyebabkan pertumbuhan butir (*grain growth*) sehingga menurunkan ketangguhan impak. Hal ini juga diperkuat oleh penelitian Liu et al.[20] yang menunjukkan bahwa *cooling rate* yang lebih lambat pada *heat input* tinggi memperbesar coarse-grain HAZ dan menurunkan toughness. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh panas masukan (*heat input*) yang sangat tinggi akibat penggunaan teknik *weaving* (ayunan) yang lambat di posisi 3G. Struktur austenitik pada E309L diketahui rentan terhadap pertumbuhan butir (*grain growth*) ketika terpapar panas tinggi dalam waktu lama. Sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan *heat input* yang tinggi dapat menyebabkan pembesaran ukuran butir, yang secara metalurgi akan menurunkan ketangguhan impak material[21]. Di sisi lain, elektroda E312 dengan struktur dupleksnya juga diketahui sensitif terhadap panas berlebih. Panas masukan yang tinggi dapat memicu presipitasi fasa intermetalik yang getas, terutama fasa sigma ( $\sigma$ ), yang juga secara drastis menurunkan ketangguhan impak. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa panas berlebih dari proses pengelasan 3G telah menyebabkan kerusakan struktur mikro pada kedua jenis elektroda. Namun, efek negatif dari pertumbuhan butir pada E309L ternyata lebih parah dalam menurunkan ketangguhannya dibandingkan efek pembentukan fasa getas pada E312 dalam kondisi panas tinggi yang sama (posisi 3G), bahkan membuatnya nilai ketangguhannya lebih rendah dari material *raw* ST 42.

*DNV Rules for Welding Qualification Tests* menekankan bahwa sambungan las pada struktur

kapal harus memiliki ketangguhan impact yang memadai untuk menghindari kegagalan getas akibat beban dinamis dan temperatur rendah. Nilai impact E309L yang lebih tinggi dibandingkan E312 menunjukkan bahwa elektroda ini lebih sesuai digunakan pada aplikasi kelautan. DNV juga mewajibkan kontrol *dilution* pada pengelasan *dissimilar* agar tidak terbentuk fasa intermetalik getas, dan temuan penelitian ini—berdasarkan Inoue et al.[15] menunjukkan bahwa E312 lebih rentan terhadap pembentukan fasa Laves akibat dilusi. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa E309L tidak hanya unggul secara mekanik, tetapi juga lebih sesuai dengan standar klasifikasi kapal dibandingkan E312.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian pengelasan SMAW dissimilar ST42 dan SS304 dengan variasi elektroda (E309L dan E312) dan posisi pengelasan (2G dan 3G), menghasilkan beberapa kesimpulan performa mekanis. Kekuatan tarik tertinggi dicapai oleh kombinasi 2G dan E309L dengan nilai 458.88 MPa. Nilai ini lebih tinggi dari nilai material dasar baja ST42 sebesar 411.99 MPa, seluruh lokasi patahan berada di material dasar ST 42 yang menandakan sambungan las bersifat *overmatching*. Hasil ini menunjukkan elektroda E309L yang stabil pada posisi pengelasan 2G yang terkontrol menghasilkan kekuatan tarik yang optimal. Temuan unik terlihat pada elektroda E312, di mana kombinasi 3G dan E312 (423.47 MPa) sedikit lebih kuat dari 2G dan E312 (415.08 MPa). Nilai ini kemungkinan akibat *heat input* yang lebih tinggi pada posisi 3G (*weaving*) menghasilkan fusi yang lebih matang dibandingkan posisi 2G (*stringer*).

Hasil pengujian impact menunjukkan bahwa semua variasi spesimen menunjukkan nilai ketangguhan lebih tinggi dari nilai material *raw* ST42 sebesar 0.64 J/mm<sup>2</sup>, namun masih jauh lebih rendah dari nilai material *raw* SS304 sebesar 4.20 J/mm<sup>2</sup>. Nilai impact tertinggi terdapat pada kombinasi 2G dan E309L dengan nilai harga impact rata-rata 1.40 J/mm<sup>2</sup>. Temuan menarik ditemukan pada kombinasi 3G dan E309L (1.00 J/mm<sup>2</sup>), yang masih lebih tinggi dari nilai *raw* ST 42. Perbedaan-perbedaan tersebut disebabkan oleh *heat input* tinggi pada posisi 3G yang *menyebabkan grain growth* yang besar pada elektroda E309L, yang terbukti lebih merusak ketangguhannya dibandingkan efek pembentukan fasa getas pada E312 dalam kondisi panas tinggi yang sama di posisi 3G.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Jeffus, *Welding: Principles and Applications 8th Edition*. Cengage Learning, 2016.
- [2] American National Standard, *Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. 2012.
- [3] R. Alfahmi, S. Saifuddin, and M. Mawardi, "Analisa kekuatan sambungan kampuh V pada pengelasan carbon steel dengan stainless steel menggunakan elektroda E 309 terhadap kekuatan impact," *Journal of Welding Technology*, vol. 3, no. 2, 2021.
- [4] R. A. Azis, S. Suharno, and H. Saputro, "Pengaruh Variasi Diameter Elektroda E7018 Terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, dan Struktur Mikro Pengelasan pada Baja Karbon Rendah Jenis SS400 dengan Metode SMAW," *jt*, vol. 17, no. 2, pp. 94–105, Dec. 2019, doi: 10.37031/jt.v17i2.53.
- [5] I. Nurcholih, W. D. Pratiwi, M. K. A. Amin, and D. Anggara, "Analisis Komparasi Kekerasan dan Struktur Mikro Lasan Dissimilar Material pada Berbagai Posisi Pengelasan di Industri Fabrikasi," *Journal of Welding Technology*, vol. 4, no. 1, 2022.
- [6] G. Gumilar, I. Abdullah, R. Suratman, and A. R. Setiawan, "Analysis Of Microstructure and Hardness of Welded Joints of Dissimilar Steel of Aisi 1018 - AISI 304," *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 20, no. 4.
- [7] O. B. Lobo, "Sifat Mekanik pada sambungan Las Dissimilar SMAW antara Baja St 42 dan SS AISI 304.," vol. 1, 2018.
- [8] E. A. Setiawan and A. A. Rosidah, "Pengaruh Variasi Posisi Pengelasan dan Diameter Elektroda pada Pengelasan Logam Tak Sejenis AISI 304 –ST42 terhadap Kekuatan Tarik dan Lebar HAZ," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. Vol.20, no. No. 1, pp. 1–4, 2023, doi: <https://doi.org/10.9744/jtm.20.1.1-4>.
- [9] A. Siswanto, Pramono Joko, *Teknik Pengelasan Busur Manual (SMAW)*. in Technology & Engineering. Penerbit Andi, 2021.
- [10] R. Siswanto, *Teknologi Pengelasan (HMKB791)*. Universitas Lambung Mangkurat, 2018.
- [11] D. Yantony, Parekke Simon, *Buku Ajar Teknologi Pengelasan Logam (Jilid 1)*. Penerbit NEM, 2023.

[12] A. Tahir, *Pengantar Mekanika Kekuatan Material*. CV. Jejak Pustaka, 2022.

[13] ASTM International, *ASTM E8/E8M: Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. doi: 10.1520/E0008\_E0008M-13A.

[14] M. André Meyers, Kumar Chawla Krishan, *Mechanical Behavior of Materials*. in Engineering, Materials Science and Engineering, Solid Mechanics and Materials. 2008.

[15] H. Inoue, R. Honma, and S. Fukumoto, "Effect of dilution on microstructures of dissimilar weld metals using nickel base alloy filler wire," *J-Stage*, vol. 30, no. 1, pp. 9–18, 2012, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.30.9>.

[16] Hyundai Welding, "S-309L-16 / SHIELDED METAL ARC WELDING CONSUMABLE FOR WELDING OF DISSIMILAR METALS STAINLESS STEELS AND CARBON STEELS OR STAINLESS STEELS AND LOW ALLOY METALS." Hyundai Welding, 2020. [Online]. Available: <https://www.hyundaiwelding.com/data/file/consumables/ttr/S-309L.16.pdf>

[17] ASTM International, *ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. doi: 10.1520/E0023-25.

[18] E. Afandi, D. Y. Sari, H. Nurdin, and B. Rahim, "ANALISA PENGARUH KUAT ARUS PENGELASAN SMAW TERHADAP KEKUATAN UJI IMPAK PADA SAMBUNGAN BAJA KARBON ST 42," *VOMEK*, no. Vol 4 No 1 (2022): Jurnal Vokasi Mekanika, pp. 58–64, 2022, doi: <https://doi.org/10.24036/vomek.v4i1.287>.

[19] Y. Hu, Y. Shi, K. Wang, and J. Huang, "Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of Local Dry Underwater Welded Duplex Stainless Steel," *Materials*, vol. 16, no. 6, p. 2289, Mar. 2023, doi: 10.3390/ma16062289.

[20] D. Liu *et al.*, "Effect of Welding Heat Input on the Microstructure and Impact Toughness of HAZ in 420 MPa-Grade Offshore Engineering Steel," *Front. Mater.*, vol. 8, p. 694586, Jul. 2021, doi: 10.3389/fmats.2021.694586.

[21] W. S. H. W. Muda, N. S. M. Nasir, S. Mamat, and S. Jamian, "EFFECT OF WELDING HEAT INPUT ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES AT COARSE

GRAIN HEAT AFFECTED ZONE OF ABS GRADE A STEEL," *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 20, p. 9, 2015.