



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Pengaruh *Preheat Treatment*, *Post Weld Heat Treatment* Pada Pengelasan SMAW Baja ST60 Terhadap Kekuatan Uji Tarik Serta Impak

Catur Wahyu Cahyono¹⁾, Untung Budiarto²⁾, Wilma Amiruddin³⁾

¹⁾Laboratorium Teknologi Material, Las, dan Produksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*e-mail : caturwahyucahyono@students.undip.ac.id

Abstrak

Baja ST60 sebagai material struktural kritis di industri perkapalan rentan mengalami penurunan sifat mekanik akibat pengelasan SMAW. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh perlakuan panas *preheat* (450 °C/15 menit) dan *PWHT annealing* (450 °C/15 menit) terhadap kekuatan tarik dan ketangguhan impak sambungan las. Metode eksperimental diterapkan menggunakan pelat baja ST60 tebal 10 mm yang dilas dengan elektroda E7018 (arus 100–140 A, tegangan 20–30 V), kemudian diuji tarik (ASTM E8) dan impak Charpy (ASTM E23). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan *preheat* dan kondisi tanpa perlakuan memiliki kekuatan tarik dan ketangguhan impak yang hampir setara. *PWHT* tunggal justru menurunkan performa mekanik, baik dari segi kekuatan tarik (432,32 MPa) maupun ketangguhan impak (0,62 J/mm²). Sebaliknya, kombinasi *preheat* dan *PWHT* (PWPR) memberikan hasil terbaik dengan kekuatan tarik tertinggi (477,90 MPa) dan impak tertinggi (0,84 J/mm²). Uji statistik menunjukkan perbedaan signifikan hanya pada parameter *fracture strain*. Temuan ini mengindikasikan bahwa perlakuan PWPR memberikan efek sinergis terhadap peningkatan performa mekanik sambungan las baja ST60.

Kata Kunci : Baja ST60, *Preheat treatment*, *Post weld heat treatment*, Pengelasan SMAW, Kekuatan tarik, Ketangguhan impak, Optimasi sambungan las.

1. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan proses krusial dalam industri manufaktur yang berfungsi untuk menyambungkan logam dalam berbagai konstruksi, termasuk di sektor perkapalan. Salah satu metode pengelasan yang paling umum digunakan adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), karena kemampuannya dalam menciptakan sambungan kuat dan aplikatif di berbagai kondisi lapangan. Baja ST60 sebagai baja karbon sedang banyak digunakan pada struktur kapal, termasuk untuk pembuatan plat lambung dan poros baling-baling, karena karakteristik mekaniknya yang baik seperti kekuatan tarik tinggi dan ketahanan terhadap beban dinamis.

Namun demikian, proses pengelasan SMAW pada baja ST60 berpotensi menimbulkan penurunan sifat mekanik, khususnya pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ). Hal ini terjadi akibat

adanya tegangan termal dan transformasi mikrostruktur yang tidak terkontrol selama proses pengelasan [1]. Tegangan sisa, pertumbuhan butir yang berlebihan, dan ketidakseragaman struktur mikro dapat menyebabkan sambungan las menjadi lebih getas dan kurang tahan terhadap beban dinamis [2]

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perlakuan panas seperti *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) berperan penting dalam mengurangi tegangan sisa dan memperbaiki struktur mikro. Penelitian pada sambungan baja pipa X80 menunjukkan bahwa PWHT pada suhu 580°C dapat meningkatkan nilai CTOD hingga 0,9 mm, namun tidak mengevaluasi pengaruh perlakuan *preheat* sebelumnya [3]. Studi lain pada aluminium 6061 menunjukkan bahwa proses *normalizing* pada suhu 415°C selama 30 menit mampu meningkatkan nilai kekerasan sebesar

2,7% [4]. Akan tetapi, penelitian yang mengkaji secara langsung sinergi antara preheat dan PWHT pada baja karbon menengah, khususnya ST60, masih sangat terbatas [5]. Padahal, kombinasi kedua perlakuan tersebut berpotensi menghasilkan efek yang saling melengkapi di mana *preheat* memperlambat laju pendinginan dan menghindari terbentuknya struktur getas, sementara PWHT membantu menghaluskan butiran dan menghilangkan tegangan sisa [6].

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh *preheat* pada temperatur 450°C selama 15 menit, serta PWHT *annealing* dengan parameter suhu dan durasi yang sama, terhadap kekuatan tarik dan ketangguhan impak sambungan las SMAW baja ST60. Kombinasi kedua perlakuan tersebut diuji secara eksperimental untuk mengamati apakah terjadi peningkatan performa mekanik secara signifikan. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap pengembangan protokol pengelasan berbasis bukti yang mampu meningkatkan integritas struktural serta mengurangi risiko kegagalan pada aplikasi kelautan.

2. METODE

2.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium untuk mengkaji pengaruh perlakuan panas terhadap sifat mekanik baja ST60 hasil pengelasan SMAW. Desain eksperimen disusun dengan membandingkan lima variasi perlakuan terhadap satu jenis material.

2.2. Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan baja ST60 sebagai objek utama. Baja ini termasuk baja karbon menengah dengan kandungan karbon berkisar antara 0,30% hingga 0,59%. Pemilihan baja ST60 didasarkan pada penggunaannya yang luas dalam industri konstruksi dan perkapalan, serta sifat mekaniknya yang mampu menahan beban tarik dan impak secara optimal.



Gambar 1. Plat Baja ST60

Komposisi kimia dan sifat mekanik material baja ST60 yang digunakan dijabarkan lebih lanjut pada tabel berikut:

Tabel 1. Kandungan Baja ST 60

Element	Value
Karbon (C)	0,300% - 0,600%
Mangan (Mn)	0,578% - 0,697%
Fosfor (P)	0,006% - 0,0204%
Silikon (Si)	0,011% - 0,240%
Sulfur (S)	0,011% - 0,015%

Tabel 2. *Mechanical Properties* Baja ST60

Sifat Mekanik	Simbol	Besaran
<i>Tensile Strength</i> (Mpa)	σ_s	450 - 600
<i>Yield Strength</i> (Mpa)	σ_b	250 - 400
<i>Hardness</i>	<i>Hb</i>	160 - 220
<i>Elongation</i> (%)	-	27-30

2.3. Lokasi Penelitian

Proses pengujian dilakukan di Laboratorium Teknologi Material, Las, dan Produksi Kapal, Universitas Diponegoro, Semarang.

2.4. Alat dan Bahan

Bahan utama yang digunakan adalah pelat baja ST60 dan elektroda E7018 berdiameter 3,2 mm. Alat-alat yang digunakan meliputi mesin las SMAW (Therma Weld 250 A), furnace listrik untuk proses preheat dan PWHT, Universal Testing Machine untuk pengujian tarik, serta mesin uji impak Charpy untuk pengujian ketangguhan. Proses perlakuan panas dilakukan dengan metode furnace cooled untuk menjaga kestabilan struktur mikro. Data hasil uji dianalisis secara deskriptif dengan menghitung nilai rata-rata dan simpangan baku.

2.5. Perlakuan Objek

2.5.1 Pemotongan Plat

Tahap pertama dalam perlakuan objek adalah pemotongan plat baja ST60. Plat awal berukuran 700 × 650 × 10 mm dipotong menggunakan mesin *flame cutting* menjadi ukuran yang sesuai untuk pengujian. Pemotongan ini bertujuan untuk mempersiapkan benda uji dengan dimensi standar, baik untuk uji tarik maupun impak. Sisi pemotongan kemudian diratakan menggunakan gerinda untuk memudahkan proses pengelasan.



Gambar 2. Plat Hasil Pemotongan

2.5.2 Proses Pengelasan

Setelah proses pemotongan, dua plat disambungkan menggunakan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Pengelasan dilakukan berdasarkan standar AWS D1.1 dengan jenis sambungan *Single V Butt Joint* bersudut 60° dan posisi pengelasan 1G. Elektroda yang digunakan adalah E7018 dengan diameter 3,2 mm. Sambungan las dilakukan menggunakan mesin THERMA WELD 250 A, dengan parameter arus 100–140 A dan tegangan 20–30 V. Untuk menjaga kualitas sambungan, nilai heat input dijaga ≤ 3 kJ/mm. Perhitungan dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$HI = \frac{V \times I \times 60}{S \times 1000} \times \eta$$

Dimana:

- V = Tegangan busur (Volt)
- I = Arus las (Ampere)
- S = Kecepatan pengelasan (mm/menit)
- η = Efisiensi busur, diambil 0,8



Gambar 3. Proses Pengelasan



Gambar 4. Plat Hasil Pengelasan

2.5.3 Perlakuan Panas (Preheat dan PWHT)

Setelah pengelasan, dilakukan perlakuan panas dengan tiga variasi perlakuan yaitu:

- a. Preheat: Pemanasan sebelum pengelasan, dilakukan pada suhu 450 °C selama 15 menit
- b. PWHT (*Post Weld Heat Treatment*): Pemanasan setelah pengelasan, juga pada suhu 450 °C selama 15 menit
- c. PWPR: Kombinasi dari kedua perlakuan di atas



Gambar 5. Proses PWHT *Annealing*

Semua perlakuan dilakukan menggunakan furnace listrik, dan pendinginan dilakukan secara perlahan (*furnace cooling*) untuk mengurangi tegangan sisa dan pertumbuhan butir.



Gambar 6. Mesin *Furnace*

2.5.4 Pembuatan Spesimen

Setelah proses perlakuan selesai, plat hasil las dipotong kembali menggunakan mesin *milling* untuk dijadikan spesimen uji. Total terdapat 5 variasi perlakuan, masing-masing terdiri dari 3 spesimen uji tarik dan 3 uji impak, sehingga jumlah total adalah 30 spesimen.

Untuk visualisasi spesimen, berikut dokumentasi gambar dari spesimen hasil potongan.



Gambar 7. Pemotongan Spesimen dengan Mesin Milling

2.6. Metode Pemecahan

Masalah utama penelitian, yaitu bagaimana perlakuan panas mempengaruhi kekuatan dan ketangguhan material, dipecahkan melalui dua jenis pengujian mekanik:

2.6.1 Uji Tarik

Pengujian tarik dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) untuk memperoleh data kekuatan tarik maksimum (UTS), kekuatan luluh (σ_y), regangan, dan modulus elastisitas. Dimensi spesimen disesuaikan dengan standar ASTM E-8M, dan luas penampang aktual digunakan untuk perhitungan tegangan.



Gambar 8. Mesin *Universal Testing Machine*



Gambar 9. Proses Pengujian Tarik

2.6.2 Uji Impak

Uji impak dilakukan untuk mengukur energi serapan spesimen terhadap beban kejut menggunakan metode Charpy V-Notch sesuai ASTM E-23. Energi yang diserap kemudian dihitung menjadi harga impak (HI) dengan rumus:

$$HI = \frac{E}{A}$$

Dimana:

HI = Harga Impak (J/mm^2)

E = Energi yang diserap (Joule)

A = Luas penampang (mm^2)

Uji ini dilakukan terhadap semua variasi perlakuan untuk membandingkan ketangguhan material.



Gambar 10. Mesin Uji Impak



Gambar 11. Pengujian Impak dengan *Impact Testing Machine*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN HASIL

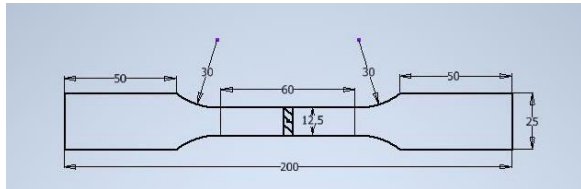
3.1. Material dan Spesimen Uji

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ST60 yang termasuk dalam kategori baja karbon menengah. Material ini memiliki kekuatan tarik tinggi dan biasa diaplikasikan pada struktur bangunan, perkapalan, serta komponen mesin.

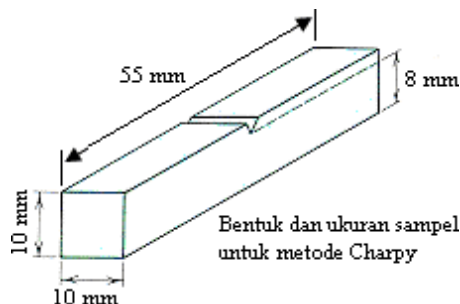
Total terdapat 5 variasi perlakuan, masing-masing terdiri dari 3 spesimen uji tarik dan 3 uji impak, sehingga jumlah total adalah 30 spesimen.

Tabel 3. Variasi Perlakuan dan Jumlah Spesimen

Perlakuan	Waktu (Menit)	Uji Impak	Uji Tarik	Jumlah Spesimen	RAW Material
Raw Material	-	3	3	6	Baja ST60 (tanpa las)
Netral	-	3	3	6	Baja ST60 + E7018
PWHT	15	3	3	6	Baja ST60 + E7018
Preheat	15	3	3	6	Baja ST60 + E7018
PWPR	15	3	3	6	Baja ST60 + E7018
Total		12	12	30	



Gambar 12. Bentuk dan Dimensi Spesimen Uji Tarik (Standar ASTM E-8M, Sub-size)



Gambar 13. Bentuk dan Dimensi Spesimen Uji Impak (Standar ASTM E-23, V-Notch)

3.2. Hasil Uji Tarik

Uji tarik dilakukan untuk memperoleh data mengenai *Yield Strength* (MPa), *Young's Modulus* (GPa), *Ultimate Strength* (MPa), *Fracture Strain*, dan *Fracture Energy* (kJ/m³).

Spesimen dibuat sesuai standar ASTM E8M (*sub-size*) dengan dimensi panjang ukur 50 mm, lebar ± 13 mm, dan tebal 10 mm. Pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dan data gaya serta regangan dicatat secara digital.

Tabel 4. Rekapitulasi Nilai Uji Tarik per Spesimen

Perlakuan	Spesimen	Yield Strength (MPa)	Young Modulus (GPa)	Ultimate Strength (MPa)	Fracture Strain	Fracture Energy (kJ/m ³)
RAW	1	357,83	203,508	470,74	0,235	71,15
	2	347,75	204,44	502,475	0,255	89,51
	3	330,39	207,12	420,116	0,205	51,95
PREHEAT	1	317,8	206,837	470,271	0,202	64,88
	2	351,93	206,376	463,369	0,205	65,43
	3	351,48	209,367	463,126	0,189	56,38
PWHT	1	342,26	204,498	490,664	0,235	71,17
	2	268,82	206,206	386,103	0,19	46,72
	3	333,51	208,047	418,437	0,173	49,65
PWPR	1	384,39	203,806	487,751	0,283	83,78
	2	325,26	202,833	477,007	0,282	80,61
	3	334,83	205,833	470,662	0,273	70,01

Berdasarkan Tabel 4 di atas, terlihat adanya variasi nilai parameter mekanik antar spesimen dalam satu kelompok perlakuan. Pada kelompok PWHT, perbedaan mencolok terlihat antara spesimen ke-2 (268,815 MPa) dan ke-1 (342,257 MPa) untuk yield strength, yang dapat mengindikasikan ketidakkonsistenan proses PWHT atau perbedaan sifat awal material.

Perlakuan PWPR (preheat + PWHT) menunjukkan nilai fracture strain tinggi dan seragam (0,273–0,283), menandakan peningkatan keuletan yang stabil. Sementara itu, kelompok RAW memperlihatkan variasi besar pada fracture energy (51,950–89,510 kJ/m³), mengindikasikan ketidakseragaman sifat mekanik material dalam kondisi asli.

Secara umum, kombinasi preheat dan PWHT (PWPR) memberikan performa terbaik, khususnya pada fracture strain dan fracture energy. Untuk mengetahui signifikansi antar perlakuan, telah dilakukan uji Two-Way ANOVA, yang ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 5. Hasil Uji ANOVA terhadap Parameter Uji Tarik

Parameter	F	Sig. (p-value)
<i>Yield Strength</i>	0,87	0,495
<i>Young Modulus</i>	2,24	0,161
<i>Ultimate Strength</i>	1,02	0,434
<i>Fracture Strain</i>	9,33	0,005
<i>Fracture Energy</i>	1,88	0,212

Berdasarkan tabel 4.2 di atas, Hasil uji ANOVA menunjukkan bahwa untuk parameter yield strength ($F = 0,871$; $p = 0,495$), Young's modulus ($F = 2,240$; $p = 0,161$), ultimate strength ($F = 1,018$; $p = 0,434$), dan fracture energy ($F = 1,878$; $p = 0,212$), tidak terdapat perbedaan yang signifikan antar perlakuan ($p > 0,05$). Dengan demikian, perlakuan preheat, PWHT, dan kombinasinya tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap keempat parameter tersebut.

Namun, pada parameter fracture strain, nilai signifikansi yang diperoleh adalah $p = 0,005$ ($F = 9,327$), yang lebih kecil dari 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan terhadap regangan maksimum saat patah. Dengan kata lain, variasi prosedur preheat dan PWHT memberikan pengaruh yang nyata terhadap kemampuan deformasi plastis baja ST60. Uji lanjut seperti post-hoc Tukey diperlukan untuk mengetahui kelompok mana yang berbeda secara signifikan.



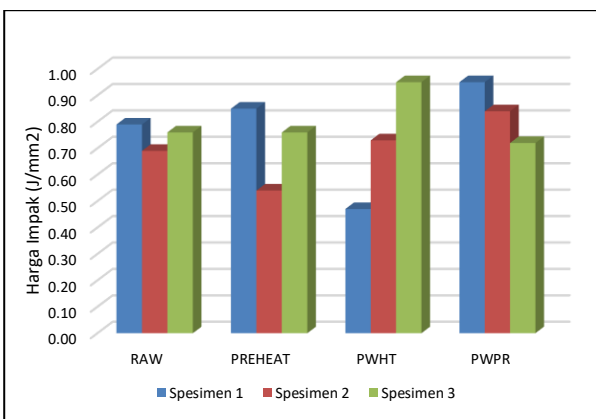
Gambar 14. Spesimen Uji Tarik Setelah Diuji

3.3. Hasil Uji Impact

Pengujian impact dilakukan menggunakan mesin Charpy V-Notch sesuai standar ASTM E-23, untuk mengetahui ketangguhan material terhadap beban kejut. Energi serapan selama patahan diuji dan dihitung menjadi harga impact (J/mm^2).

Tabel 6. Rekapitulasi Nilai Uji Impact per Spesimen

Perlakuan	Spesimen	Luas (mm^2)	Energi Terserap (J)	Harga Impact (J/mm^2)	Rata-rata (J/mm^2)
RAW	1	83,2	66	0,79	0,72
	2	84,4	58	0,69	
	3	86,8	58	0,67	
PREHEAT	1	92	78	0,85	0,72
	2	88,8	48	0,54	
	3	89,2	68	0,76	
PWHT	1	89,6	42	0,47	0,62
	2	90,4	60	0,66	
	3	92,8	68	0,73	
PWPR	1	90,8	86	0,95	0,84
	2	94	79	0,84	
	3	88,8	64	0,72	



Gambar 15. Grafik Nilai Impact Uji Impact

Berdasarkan Tabel 4.3 di atas, berdasarkan nilai rata-rata, perlakuan PWPR menunjukkan hasil tertinggi, yaitu $0,84 \text{ kJ/m}^2$, dengan nilai tertinggi spesifik sebesar $0,95 \text{ kJ/m}^2$ (Spesimen 1). Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi perlakuan termal dapat meningkatkan ketangguhan material secara lebih konsisten dibanding perlakuan tunggal.

Sebaliknya, perlakuan PWHT menunjukkan nilai rata-rata terendah yaitu $0,62 \text{ kJ/m}^2$, dan spesimen 1 dari kelompok ini mencatatkan nilai terendah dari seluruh data, yaitu $0,47 \text{ kJ/m}^2$. Temuan ini mengindikasikan bahwa PWHT tanpa didahului preheat dapat menurunkan nilai ketangguhan.

Perlakuan PREHEAT dan RAW memiliki rata-rata yang identik ($0,72 \text{ kJ/m}^2$), yang menunjukkan bahwa pengaruh preheat saja tidak terlalu berbeda dibandingkan kondisi material tanpa perlakuan. Namun, PREHEAT menunjukkan variasi nilai yang cukup lebar antar spesimen, dari $0,54$ hingga $0,85$, menandakan adanya ketidakkonsistenan pengaruh perlakuan ini terhadap ketangguhan.



Gambar 16. Spesimen Uji Impact Setelah Diuji

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan preheat dan post weld heat treatment (PWHT), baik secara tunggal maupun dalam bentuk kombinasi (PWPR), memberikan dampak tertentu terhadap sifat mekanik baja ST60 hasil pengelasan SMAW. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa kombinasi preheat dan PWHT (PWPR) menghasilkan performa mekanik paling optimal dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini terlihat dari nilai yield strength, ultimate strength, dan fracture strain yang secara umum lebih tinggi dan lebih konsisten antar spesimen. Terutama pada parameter fracture strain, kelompok PWPR menunjukkan nilai tertinggi dan paling seragam, yang menunjukkan bahwa kombinasi perlakuan termal mampu meningkatkan kemampuan deformasi plastis material sebelum patah.

Namun, ketika dilihat dari sisi signifikansi statistik melalui uji ANOVA, sebagian besar parameter mekanik seperti yield strength, young modulus, ultimate strength, dan fracture energy tidak menunjukkan perbedaan signifikan antar kelompok perlakuan, dengan $p\text{-value} > 0,05$.

Hanya pada parameter fracture strain diperoleh nilai $F = 9,327$ dan $p = 0,005 (< 0,05)$, yang menunjukkan adanya pengaruh signifikan antar perlakuan terhadap kemampuan regangan maksimum. Temuan ini menegaskan bahwa perlakuan termal, khususnya dalam bentuk kombinasi (PWPR), memang memberikan dampak nyata terhadap aspek keuletan material, meskipun tidak sepenuhnya signifikan terhadap kekuatan tarik secara umum.

Perlakuan preheat secara tunggal menunjukkan hasil yang cukup baik pada kekuatan tarik, tetapi tidak signifikan secara statistik. Rata-rata nilai ultimate strength kelompok preheat cukup tinggi dan stabil antar spesimen, mengindikasikan bahwa pemanasan awal mampu mengurangi kemungkinan terbentuknya cacat las atau tegangan sisa berlebih pada daerah HAZ. Meski begitu, uji statistik menunjukkan bahwa pengaruh preheat terhadap yield strength ($p = 0,410$) dan ultimate strength ($p = 0,260$) masih belum signifikan. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh variasi lokal pada suhu pemanasan atau heterogenitas sifat awal material.

Sebaliknya, perlakuan PWHT tanpa didahului preheat memberikan hasil paling rendah pada pengujian impak, baik dari segi rata-rata maupun nilai minimum. Nilai rata-rata fracture energy untuk kelompok ini hanya sebesar $0,62 \text{ kJ/mm}^2$, dengan spesimen terendah mencapai $0,47 \text{ kJ/mm}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa PWHT tunggal berpotensi menurunkan ketangguhan material, terutama jika tidak dikombinasikan dengan perlakuan pemanasan awal. Meskipun secara teoritis PWHT bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa dan memperbaiki struktur mikro, namun dalam konteks ini, perlakuan tersebut justru menurunkan kemampuan material dalam menyerap energikejut.

Analisis pengujian impak menunjukkan bahwa perbedaan antar perlakuan terhadap nilai fracture energy juga tidak signifikan secara statistik. Nilai $F = 1,551$ dan $p = 0,275 (> 0,05)$ pada uji ANOVA menunjukkan bahwa variasi perlakuan belum cukup kuat memengaruhi ketangguhan baja ST60 secara statistik. Meskipun demikian, secara deskriptif, kelompok PWPR kembali menunjukkan performa terbaik dan paling stabil antar spesimen, memperkuat kesimpulan bahwa kombinasi perlakuan termal memberikan hasil paling positif terhadap sifat mekanik material.

Seluruh temuan ini menunjukkan bahwa secara umum, kombinasi preheat dan PWHT (PWPR) memberikan pengaruh paling menguntungkan terhadap performa mekanik baja ST60 yang dilas menggunakan metode SMAW, baik dalam pengujian tarik maupun impak. Meski

begitu, sebagian besar perbedaan antar perlakuan belum signifikan secara statistik. Hal ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti keterbatasan jumlah sampel, ketidakkonsistenan parameter perlakuan, atau variasi mikroskopik dalam struktur material. Oleh karena itu, untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam dan validasi yang lebih kuat, diperlukan studi lanjutan dengan kontrol proses yang lebih ketat serta pendekatan mikrostruktur sebagai pendukung analisis mekanik.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini secara definitif menjawab tiga tujuan utama: pertama, Perlakuan preheat sebelum proses pengelasan memberikan pengaruh positif terhadap kekuatan tarik baja ST60. Spesimen yang hanya diberi perlakuan preheat menunjukkan peningkatan kekuatan tarik dan regangan dibandingkan spesimen netral (tanpa perlakuan), meskipun peningkatannya belum signifikan. Kedua, Perlakuan post weld heat treatment (PWHT) memberikan dampak yang bervariasi terhadap kekuatan impak. Perlakuan PWHT tunggal justru menurunkan ketangguhan material akibat pertumbuhan butir mikrostruktur yang berlebihan, sehingga material menjadi lebih getas. Namun, PWHT tetap bermanfaat apabila dikombinasikan dengan preheat. Ketiga, Interaksi antara perlakuan preheat dan PWHT (kombinasi Preheat + PWHT) menunjukkan hasil paling optimal dalam meningkatkan baik kekuatan tarik maupun kekuatan impak baja ST60. Kombinasi ini mampu memperbaiki struktur mikro, mengurangi tegangan sisa, serta meningkatkan kemampuan material menyerap energi benturan dan menahan beban tarik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. I. R. W. U. B. and W. A. J. Hasil, "JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Pengaruh Perlakuan Panas (Heat Treatment) Normalizing Terhadap Kekuatan Impak Aluminium 6061 Pengelasan MIG dengan Variasi Posisi dan Bentuk Kampuh," Jurnal teknik perkapalan, 2021.
- [2] S. Suherman, Teknik Pengelasan (Cara Menghindari Cacat Las). Umsu Press, 2021.
- [3] Evans. G. M, Metallurgy of Basic Weld Metal. 1997.
- [4] C. D, Heat Treatment of Welded Steel Structure. Elsevier Science, 1996.
- [5] Wang. X et al, "Effect of Post-Weld Heat Treatment on Microstructure and Fracture Toughness of X80 Pipeline Steel Welded Joint," Materials (Basel), 2022.

- [6] Suherman. S dan Abdullah. I, TEKNIK PENGELASAN (CARA MENGHINDARI CACAT LAS). 2020.
- [7] Effendi. N, Studi pengaruh heat input terhadap ketangguhan impact las SMAW posisi vertikal baja ST 60 temper. Traksi, 2009.
- [8] Eva. E, Aafi. A, Desysetyowulans. D, dan Perencanaan. P, STRUKTUR STRUKTUR BAJA BAJA AS AS TEKNIK TEKNIK JSUMA JSUMA PURWOKERTO PURWOKERTO.
- [11] F. Arief dan T. H. Ningsih, PENGARUH VARIASI HOLDING TIME *PWHT* PADA HASIL PENGELASAN SMAW BAJA AISI 1045 TERHADAP NILAI UJI TARIK. Teknik Mesin Universitas Surabaya, 2023.
- [10] Prabakaran. M. P dan Kannan. G. R, Effects of post-weld heat treatment on dissimilar laser welded joints of austenitic stainless steel to low carbon steel. 2021.
- [11] M. Q. Yang. Y. Xu. Z. and Li. Y. Hu. X, “, ‘Effect of Postweld Heat Treatment on Microstructure and Properties of Thick S11306 Ferritic Stainless Welded Joints,’ Metals (Basel),” 2023.
- [12] Andrea. A.R, Jatimurti. W, dan Noerrochim. L, “Pengaruh Variasi Holding Temperatur dan Terhadap Struktur Mikro dan Distribusi 600 Dengan Metode Smaw Di PT . Holcim Indonesia,” 2018.
- [13] A. Ferdi dan A. Hafizh, “ANALISIS PENGARUH VARIASI ARUS PADA PENGELASAN SMAW BAJA ST 60 TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN POROSITAS” JTM. 2023.
- [14] S. J. A. W. R. Redi, ““Analisa Kekuatan Puntir, Kekuatan Tarik, dan Kekerasan Baja ST 60 sebagai Bahan Poros Baling-baling Kapal setelah Proses Tempering,”” Jurnal teknik perkapalan, 2017.
- [15] Andi, Teknik Pengelasan Gas Metal (MIG/MAG) SMK/MAK XII. Program Keahlian Teknik Mesin. Kompetensi Keahlian Teknik Pengelasan (Edisi Revisi). 2021.