



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Pengaruh Variasi Arus Listrik dan Post Weld Heat Treatment Terhadap Kekuatan Uji Tarik dan Uji Impak Pada Pengelasan SMAW Baja ST 60

Navidra Argie Aguslemi¹⁾, Wilma Amiruddin²⁾, Untung Budiarto³⁾

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 : navidraargie@students.undip.ac.id

Abstrak

Pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW) merupakan metode penyambungan yang banyak digunakan pada konstruksi kapal. Kualitas sambungan las dipengaruhi oleh parameter pengelasan, terutama variasi arus listrik dan Post Weld Heat Treatment (PWHT), yang berpengaruh terhadap sifat mekanik material. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi arus listrik 100 A, 110 A, dan 120 A serta perlakuan Non PWHT, PWHT 650°C, dan PWHT 750°C terhadap kekuatan tarik dan ketangguhan impak sambungan las baja ST 60, serta menentukan kombinasi parameter yang memberikan sifat mekanik terbaik. Penelitian menggunakan baja ST 60 yang dilas dengan proses SMAW posisi 1G menggunakan elektroda AWS E7018 berdiameter 3,2 mm. Pengujian tarik mengacu pada ASTM E8 dan pengujian impak mengacu pada ASTM E23 yang masing – masing spesimen dibuat 27 spesimen uji tarik dan 27 spesimen uji impak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tegangan tarik tertinggi sebesar 434,10 MPa, regangan sebesar 28,00%, dan modulus elastisitas sebesar 251,18 GPa diperoleh pada spesimen PWHT 750°C dengan arus 120 A, yang mengindikasikan bahwa kombinasi perlakuan tersebut mampu meningkatkan keuletan sekaligus mempertahankan kekuatan las. Sementara itu, nilai impak tertinggi sebesar 1,98 J/mm² diperoleh pada PWHT 650°C dengan arus 110 A, sedangkan nilai terendah sebesar 1,09 J/mm² terdapat pada PWHT 750°C dengan arus 100 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan temperatur PWHT dan arus pengelasan tidak selalu meningkatkan sifat mekanik secara bersamaan. PWHT 750°C dengan arus 120 A lebih efektif meningkatkan sifat tarik, sedangkan PWHT 650°C dengan arus 110 A memberikan ketangguhan impak terbaik, sehingga pemilihan parameter pengelasan perlu disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi konstruksi kapal.

Kata Kunci : SMAW, ST 60, Arus, PWHT, Uji Tarik dan Uji Impak

1. PENDAHULUAN

Pengelasan adalah proses penyambungan material yang banyak digunakan dalam bidang manufaktur dan konstruksi, terutama pada baja karbon menengah seperti baja ST 60. Salah satu teknik yang umum diterapkan ialah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Kualitas hasil las sangat dipengaruhi oleh parameter proses, seperti besar arus listrik, serta adanya perlakuan panas setelah pengelasan yang dikenal sebagai *Post Weld Heat Treatment* (PWHT).

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) atau *stick welding* merupakan metode pengelasan yang banyak digunakan di industri. Proses ini memakai elektroda berlapis fluks sebagai logam pengisi sekaligus pelindung busur listrik. SMAW populer

karena peralatannya sederhana, fleksibilitas dalam pemakaian, dan biaya operasionalnya relatif rendah

SMAW adalah proses pengelasan yang menggunakan busur listrik antara elektroda dan logam dasar untuk menghasilkan panas sehingga logam meleleh dan menyatu. Lapisan fluks pada elektroda menghasilkan gas pelindung dan slag untuk melindungi hasil las dari kontaminasi udara [1].

SMAW merupakan metode pengelasan yang ekonomis, mudah digunakan, peralatannya sederhana, fleksibilitas dalam pemakaian, dan biaya operasionalnya relatif rendah.

Penelitian menunjukkan bahwa hasil pengelasan SMAW dipengaruhi oleh kondisi pengelasan dan perlakuan panas yang menentukan mikrostruktur serta sifat mekanik sambungan las [2] [3].

Baja merupakan material utama dalam konstruksi kapal karena memiliki kekuatan dan ketahanan tinggi terhadap kondisi laut. Perkembangan teknologi konstruksi kapal juga meningkatkan efisiensi proses pembangunan dan perbaikan kapal.

Baja merupakan logam paduan berbahan utama besi dengan kandungan karbon yang memengaruhi kekerasan dan kekuatannya. Baja ST 60 termasuk baja karbon sedang yang banyak digunakan pada konstruksi kapal karena memiliki kemampuan las yang baik.

Baja ST 60 merupakan baja karbon menengah dengan kandungan karbon sekitar 0,3%–0,59% yang memiliki kekuatan dan kekerasan cukup tinggi. Baja ini banyak digunakan pada konstruksi kapal, jembatan, tangki, serta komponen permesinan, termasuk poros propeller karena telah memenuhi standar baja karbon BKI. Namun, baja ST 60 masih rentan mengalami keausan akibat kekerasan permukaannya yang lebih rendah dibandingkan bantalan propeller [4].

Variasi arus memengaruhi sifat mekanis dan kualitas las pada pengelasan SMAW. Pada hasil penelitian menunjukkan bahwa arus 95 A menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 467,19 MPa dibandingkan 110 A dan 130 A, sehingga pemilihan arus yang tepat sangat penting untuk memperoleh hasil pengelasan optimal [5].

Variasi arus listrik pada pengelasan SMAW berpengaruh besar terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan las [6]. Penelitian lain menunjukkan bahwa arus yang lebih tinggi dapat meningkatkan kekuatan impak dan kekuatan tarik, sedangkan arus rendah menghasilkan sifat mekanik yang lebih rendah [7]. Namun penelitian lain menyatakan bahwa arus tinggi juga dapat membuat turun kekerasan meskipun tidak signifikan [8].

Selain arus listrik, parameter pengelasan seperti *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) juga berpengaruh terhadap kualitas sambungan las. PWHT dilakukan setelah pengelasan untuk mengurangi tegangan sisa dan memperbaiki struktur mikro akibat pemanasan yang tidak merata. Penelitian pada baja AISI 1045 menunjukkan bahwa suhu PWHT 600°C menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, sedangkan 700°C memberikan regangan dan kuat luluh lebih baik. Pada suhu 800°C, kekerasan meningkat namun kekuatan tarik menurun [9]. Selain itu, peningkatan arus SMAW dapat menaikkan kekerasan baja, sementara kenaikan temperatur PWHT cenderung menurunkannya [10].

Sebagai salah satu baja karbon sedang, baja ST 60 memiliki sifat yang dipengaruhi oleh variasi arus pengelasan dan perlakuan panas setelah pengelasan (*Post Weld Heat Treatment* / PWHT). Pengaturan arus listrik dan PWHT yang tepat dapat meningkatkan sifat mekanik sambungan las, seperti kekuatan tarik dan kekuatan impak. Oleh karena itu, analisis pengaruh variasi arus dan PWHT pada pengelasan SMAW baja ST 60 penting dilakukan guna memastikan kualitas serta keandalan hasil pengelasan.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam menentukan parameter arus pengelasan dan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) yang paling optimal untuk meningkatkan kualitas sambungan las baja ST 60. Pemahaman mengenai pengaruh kedua parameter tersebut terhadap sifat mekanik baja ST 60 juga dapat membantu industri manufaktur dalam meningkatkan kualitas dan efisiensi produksi serta meminimalkan risiko kegagalan sambungan las pada aplikasi struktural.

2. METODE

2.1. Prosedur Penelitian

Tahap awal penelitian dilakukan dengan memotong pelat baja ST 60 tebal 10 mm menggunakan metode *flame cutting* di Laboratorium Proses Produksi Teknik Mesin Universitas Diponegoro. Pelat dengan tebal 10 mm dipotong menjadi ukuran panjang 20 cm dan lebar 10 cm untuk digunakan sebagai material pengelasan.



Gambar 1. Baja ST 60

Tabel 1. Komposisi Baja ST 60

Baja ST 60	
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* ST 60

Sifat Mekanik	Simbol	Besaran
<i>Tensile Strength</i> (MPa)	σ_s	569 - 600
<i>Yield Strength</i> (MPa)	σ_b	343 - 400
<i>Hardness</i>	Hb	160 - 200
<i>Elongation</i> (%)		20 - 30

Gambar 1 menunjukkan pelat baja ST 60 berdimensi panjang 20 cm dan lebar 10 cm. Komposisi dan *mechanical properties* dari baja ST 60 ditunjukkan pada tabel 1 dan tabel 2.

Selanjutnya, pelat dipreparasi menjadi kampuh las tipe *single V-butt joint* dengan sudut 60°. Proses penyambungan dilakukan menggunakan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) pada posisi datar (1G) dengan elektroda E7018 berdiameter 3,2 mm. Variasi penelitian meliputi kuat arus pengelasan sebesar 100 A, 110 A, dan 120 A, serta perlakuan PWHT pada suhu 650°C, 750°C, dan tanpa PWHT.



Gambar 2. Proses Pengelasan SMAW dengan posisi pengelasan 1G



Gambar 3. Sambungan *Single V Butt Joint* 60°

Gambar 2 menunjukkan proses pengelasan yang dipakai yaitu SMAW dengan posisi pengelasan 1G atau posisi datar atau *downhand*. Gambar 3 menunjukkan jenis sambungan *single V butt joint* 60°.

Setelah pengelasan selesai, dilakukan proses PWHT selama 30 menit kemudian didinginkan secara alami. Spesimen uji selanjutnya dibentuk sesuai standar ASTM E8 untuk uji tarik dan ASTM E23 untuk uji impak (*Charpy V-notch*) dengan masing – masing spesimen dibuat sebanyak 27 spesimen uji tarik dan 27 spesimen uji impak. Proses pengelasan, PWHT, dan pembuatan spesimen dilakukan di Inlastek Welding-Institute. Tahap akhir penelitian berupa pengujian tarik dan impak yang dilaksanakan di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk menentukan nilai tegangan tarik maksimum, regangan, modulus elastisitas, dan harga impak pada setiap variasi penelitian. Gambar 4 menunjukkan spesimen uji tarik dan uji impak.



Gambar 4. Spesimen Uji Tarik dan Uji Impak

2.2. Pengujian Tarik

Uji tarik adalah metode untuk mengetahui sifat mekanik material, terutama kekuatan dan keuletannya, dengan memberikan gaya tarik hingga material mengalami deformasi atau patah. Pengujian ini menggunakan alat seperti mesin uji universal, *load cell*, dan ekstensometer untuk mengukur gaya serta pertambahan panjang material. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi karakteristik material dan menentukan parameter proses manufaktur maupun perlakuan panas yang sesuai [11]. Berdasarkan standar pengujian yang digunakan dalam penelitian ini, parameter mekanik yang diukur adalah:

1. Tegangan Tarik Maksimum (σ)

Tegangan tarik merupakan nilai beban terbesar yang dapat ditahan material, yang diperoleh dari hasil pembagian gaya maksimum terhadap luas penampang awal spesimen sebelum terjadi perpatahan. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

Di mana, (σ) adalah Tegangan tarik maksimum (MPa atau N/mm²), P adalah Beban maksimum (N), dan A_0 adalah Luas penampang mula-mula (mm²)

2. Regangan Tarik Maksimum (e)

Regangan tarik maksimum adalah nilai pertambahan panjang terbesar yang dapat dicapai material setelah pengujian tarik dilakukan. Parameter ini menunjukkan tingkat pemanjangan material dibandingkan dengan panjang awalnya sebelum mengalami perpatahan. Rumus yang digunakan ditunjukkan sebagai berikut:

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

$$e = \frac{L_i - L_0}{L_0} \times 100\%$$

Di mana, e adalah Regangan (%), L_i adalah Panjang sesudah patah (mm), dan L_0 adalah Panjang mula-mula (mm)

3. Modulus Elastisitas (E)

Modulus elastisitas merupakan parameter yang menggambarkan tingkat kekakuan suatu kurva tegangan-regangan, dinyatakan dalam persamaan berikut:

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

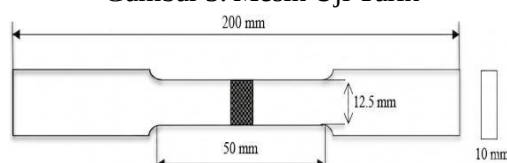
Di mana, E adalah Modulus Elastisitas (MPa), (σ) Tegangan *Yield* (N/mm²), dan e adalah Regangan *Yield* (%) [12].

Berdasarkan ASTM E8/E8M, standar ASTM E8/E8M, spesimen uji tarik hasil pengelasan umumnya diambil dari daerah logam las, zona pengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), dan logam induk untuk mendapatkan pemahaman menyeluruh mengenai karakteristik sambungan las.

Hasil pengujian tersebut sangat penting dalam memastikan bahwa sambungan las telah memenuhi persyaratan teknis serta standar yang berlaku pada aplikasi struktural, khususnya di bidang otomotif, perminyakan, dan konstruksi. Hasil uji tarik pada sambungan las dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis material, metode pengelasan, parameter proses pengelasan (arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan), serta perlakuan panas setelah pengelasan. Oleh sebab itu, uji tarik menjadi metode penting dalam validasi dan pengendalian kualitas pengelasan logam.



Gambar 5. Mesin Uji Tarik



Gambar 6. Spesimen Tarik Sesuai ASTM E8[14]

Keterangan:

<i>Gauge length</i> (G)	50 mm
<i>Width</i> (W)	12,5 mm
<i>Thickness</i> (T)	10 mm
<i>Radius of Fillet</i> (R)	12,5 mm
<i>Overall Length</i> (L)	200 mm

Gambar 5 menunjukkan mesin uji tarik yang digunakan untuk pengujian dan gambar 6 adalah spesimen uji tarik sesuai ASTM E8 beserta keterangannya.

2.3. Pengujian Impak

Pengujian impact merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengevaluasi ketangguhan material hasil pengelasan terhadap beban kejut atau benturan secara tiba-tiba. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya energi yang mampu diserap oleh sambungan las sebelum mengalami keretakan atau patah, sehingga dapat menunjukkan tingkat ketahanan material terhadap fraktur getas.

Salah satu metode yang umum diterapkan adalah uji impact *Charpy*, yaitu pengujian menggunakan spesimen bertakik standar yang diberikan beban benturan guna mengukur energi yang terserap pada saat spesimen patah [13].

Pengujian impact penting dilakukan karena proses pengelasan dapat mengubah struktur mikro pada daerah las dan HAZ yang berpengaruh terhadap ketangguhan material. Hasil uji dipengaruhi oleh komposisi kimia, struktur mikro, dan prosedur pengelasan, sehingga pengujian ini digunakan untuk memastikan sambungan las memenuhi standar ketangguhan yang ditetapkan.

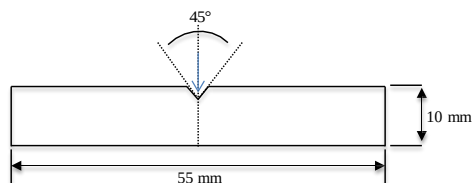
Besarnya energi yang diserap selama terjadinya perpatahan dapat diketahui secara langsung melalui skala pada mesin uji yang telah dikalibrasi. Secara kuantitatif, nilai harga impact (HI) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

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

Di mana, HI adalah Harga Impact (Joule/mm²), E adalah Energi yang diserap oleh spesimen (Joule), dan A adalah Luas penampang spesimen di bawah takik (mm²).



Gambar 7. Mesin Uji Impact



Gambar 8. Spesimen Impak Sesuai ASTM E23[15]

Keterangan:

Overall length (L)	55 mm
Width (W)	10 mm
Thickness (T)	10 mm
Notched Angle Charpy	45°
Notched Thickness	2 mm

Gambar 7 menunjukkan mesin uji impak yang digunakan untuk pengujian dan gambar 8 adalah spesimen uji impak sesuai ASTM E23 beserta keterangannya.

2.4. Post Weld Heat Treatment (PWHT)

Post Weld Heat Treatment (PWHT) merupakan proses perlakuan panas setelah pengelasan yang bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa, memperbaiki struktur mikro, serta meningkatkan ketangguhan, keuletan, dan ketahanan sambungan las terhadap retak maupun korosi.

Proses PWHT dilakukan dengan memanaskan logam pada suhu tertentu, menahannya selama waktu tertentu, lalu mendinginkannya secara terkontrol. Perlakuan ini penting terutama pada komponen yang bekerja pada suhu dan tekanan tinggi, seperti bejana tekan, pipa uap, serta struktur di industri petrokimia dan pembangkit listrik.

Meskipun memberikan banyak manfaat, PWHT juga dapat menimbulkan risiko apabila dilakukan tidak sesuai prosedur, seperti penurunan kekuatan material akibat pemanasan berlebih (*over-tempering*), distorsi karena pemanasan yang tidak merata, serta kerusakan mikrostruktur akibat terbentuknya fasa atau butiran kasar yang tidak diinginkan [16]. Gambar 9 menunjukkan proses PWHT menggunakan *furnace*



Gambar 9. Proses PWHT

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengelasan

Proses pengelasan dilakukan menggunakan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) pada posisi 1G dengan elektroda AWS E7018 berdiameter 3,2 mm. Parameter pengelasan dikontrol untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kualitas sambungan las, dengan tegangan sebesar 25 V dan kecepatan pengelasan 12 cm/menit. Variasi utama dalam penelitian ini adalah penggunaan kuat arus sebesar 100 A, 110 A, dan 120 A.

3.2. Masukan Panas (*Heat Input*)

Berdasarkan proses pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) yang telah dilakukan, diperoleh nilai masukan panas (*heat input*) yang berbeda pada setiap parameter pengelasan. *Heat Input* adalah energi yang diserap material selama proses pengelasan. Variasi tersebut dipengaruhi oleh besar arus listrik dan kecepatan pengelasan (*travel speed*) yang digunakan pada spesimen baja ST 60. Perhitungan *heat input* dilakukan untuk mengetahui pengaruh distribusi panas terhadap sifat mekanik dan struktur material pada daerah sambungan las. Nilai *heat input* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$HI = \frac{60 \times V \times I}{v} \quad (4)$$

Di mana, HI adalah *Heat Input* (Joule/cm), V adalah Tegangan Busur (Volt), I adalah Kuat Arus (Ampere), dan v adalah Kecepatan Las (cm/menit)

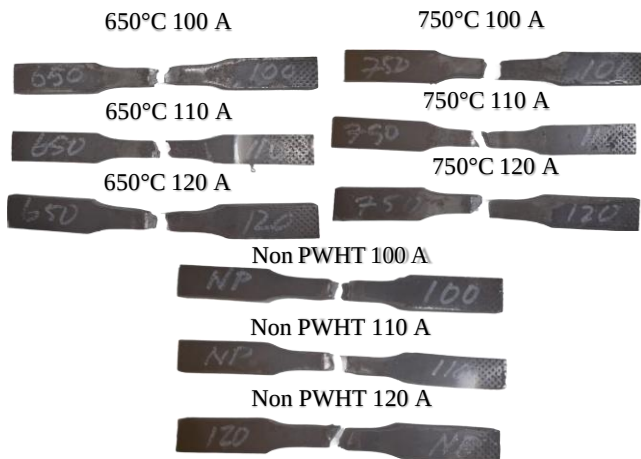
Hasil perhitungan masukan panas untuk setiap variasi arus pengelasan ditunjukkan sebagai berikut:

- *Heat Input* 100 A = $\frac{60 \times 25 \times 100}{12}$
= 12500 Joule/cm
- *Heat Input* 110 A = $\frac{60 \times 25 \times 110}{12}$
= 13750 Joule/cm
- *Heat Input* 120 A = $\frac{60 \times 25 \times 120}{12}$
= 15000 Joule/cm

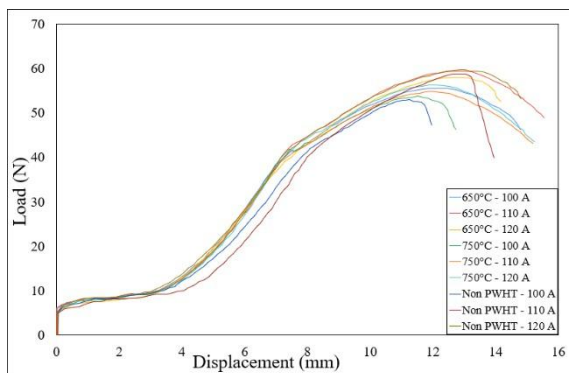
3.3. Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan berdasarkan standar ASTM E8 pada tanggal 21 Januari 2026 di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro, Semarang. Pengujian ini menghasilkan data berupa tegangan tarik, regangan tarik, dan modulus elastisitas yang digunakan untuk menganalisis kekuatan tarik baja ST 60 setelah

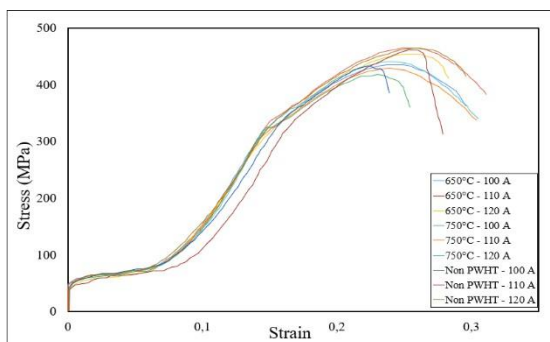
melalui proses pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Penelitian dilakukan dengan variasi arus pengelasan sebesar 100 A, 110 A, dan 120 A, serta perlakuan PWHT pada suhu 650°C dan 750°C, serta tanpa perlakuan PWHT. Gambar 10 menunjukkan spesimen setelah dilakukan pengujian tarik.



Gambar 10. Spesimen Setelah Pengujian Tarik



(a)



(b)

Gambar 11. (a) Grafik Load-Displacement, (b) Grafik Stress-Strain

Gambar 11 (a) dan (b) menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan dan perlakuan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) memberikan pengaruh terhadap karakteristik mekanik sambungan las baja ST 60. Kurva *load-displacement* menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan meningkatkan kemampuan spesimen dalam menahan beban sebelum mengalami patah. Hal ini ditunjukkan oleh spesimen 120 A dengan PWHT 750°C yang memiliki beban maksimum dan *displacement* terbesar dibandingkan variasi lainnya. Hasil tersebut sejalan dengan data uji tarik yang menunjukkan nilai rata-rata tegangan tarik sebesar 434,10 MPa, regangan sebesar 28,00%, dan modulus elastisitas sebesar 251,18 GPa. Sebaliknya, spesimen Non PWHT 100 A menghasilkan nilai tegangan tarik rata-rata 394,85 MPa dengan regangan 20,67%, sehingga menunjukkan kemampuan deformasi yang lebih rendah sebelum mengalami kegagalan.

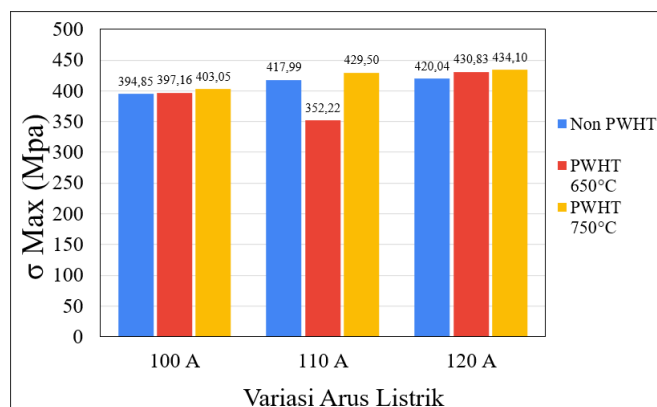
Grafik *stress-strain* menunjukkan bahwa seluruh spesimen mengalami daerah elastis yang diikuti daerah plastis sebelum patah. Peningkatan arus pengelasan dari 100 A menjadi 120 A meningkatkan *heat input* sehingga penetrasi las menjadi lebih baik dan ikatan metalurgi pada daerah sambungan semakin kuat. Selain itu, perlakuan PWHT 750°C menyebabkan daerah plastis pada kurva menjadi lebih panjang, yang menunjukkan peningkatan kemampuan material dalam mengalami deformasi sebelum patah. Kondisi ini mengindikasikan bahwa perlakuan panas mampu mengurangi tegangan sisa hasil pengelasan serta menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata selama proses pembebanan.

Kombinasi arus 120 A dan PWHT 750°C memberikan karakteristik mekanik yang paling baik dibandingkan variasi lainnya. Kombinasi tersebut menghasilkan keseimbangan antara kekuatan tarik, kekakuan, dan keuletan yang ditunjukkan oleh tingginya nilai tegangan tarik, regangan, serta kemampuan spesimen menahan beban hingga *displacement* yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan *heat input* yang diikuti perlakuan PWHT 750°C mampu memperbaiki homogenitas struktur mikro pada logam las dan daerah *Heat Affected Zone* (HAZ), sehingga sambungan las memiliki performa mekanik yang lebih optimal.

3.3.1. Tegangan Tarik

Tabel 3. Data Hasil Pengujian Tegangan Tarik

SPEKIMEN	A0 (mm ²)	P Max (N)	σ Max (MPa)	SD	σ Rata- rata (MPa)
Non PWHT – 100 A	130,81	51,7	395,23	1,74	394,85
	125,46	49,3	392,95		
	131,44	52,1	396,37		
650°C – 100 A	132,08	52,4	396,72	1,75	397,15
	142,80	56,5	395,65		
	139,32	55,6	399,08		
750°C – 100 A	130,00	52,1	400,76	2,00	403,04
	132,98	53,7	403,82		
	129,28	52,3	404,54		
Non PWHT – 110 A	140,61	58,7	417,24	3,03	417,99
	131,04	55,2	421,24		
	142,56	59,2	415,26		
650°C – 110 A	127,72	45,4	355,46	3,07	352,22
	128,52	44,9	349,36		
	122,50	43,1	351,83		
750°C – 110 A	122,40	52,7	430,55	3,11	429,49
	138,03	58,8	425,99		
	133,35	57,6	431,94		
Non PWHT – 120 A	123,19	51,9	421,30	1,34	420,03
	128,75	53,9	418,64		
	129,47	54,4	420,17		
650°C – 120 A	134,40	58,2	433,03	1,94	430,83
	129,98	55,9	430,06		
	126,69	54,4	429,39		
750°C – 120 A	127,05	54,9	432,11	2,63	434,10
	131,84	57,1	433,10		
	134,07	58,6	437,08		



Gambar 12. Diagram Tegangan Tarik

Berdasarkan tabel 3 dan gambar 12, spesimen tanpa PWHT menunjukkan peningkatan tegangan tarik dari 394,85 MPa pada arus 100 A menjadi 417,99 MPa pada arus 110 A dan meningkat kembali menjadi 420,03 MPa pada arus 120 A. Pada spesimen PWHT 650°C, nilai tegangan tarik meningkat dari 397,15 MPa pada arus 100 A menjadi 430,83 MPa pada arus 120 A, namun mengalami penurunan yang cukup signifikan pada arus 110 A menjadi 352,22 MPa. Sementara itu, spesimen PWHT 750°C menunjukkan peningkatan yang relatif stabil, yaitu 403,04 MPa, 429,49 MPa, dan 434,10 MPa pada arus 100 A, 110 A, dan 120 A.

Peningkatan tegangan tarik seiring bertambahnya arus menunjukkan bahwa *heat input* yang lebih besar mampu meningkatkan kualitas peleburan logam induk dan logam pengisi sehingga ikatan sambungan menjadi lebih baik. Kondisi tersebut memungkinkan beban tarik terdistribusi lebih merata selama pengujian sehingga sambungan mampu menahan beban maksimum yang lebih tinggi. Selain itu, peningkatan arus hingga 120 A masih berada dalam rentang parameter pengelasan yang sesuai sehingga tidak menyebabkan penurunan kekuatan akibat panas berlebih.

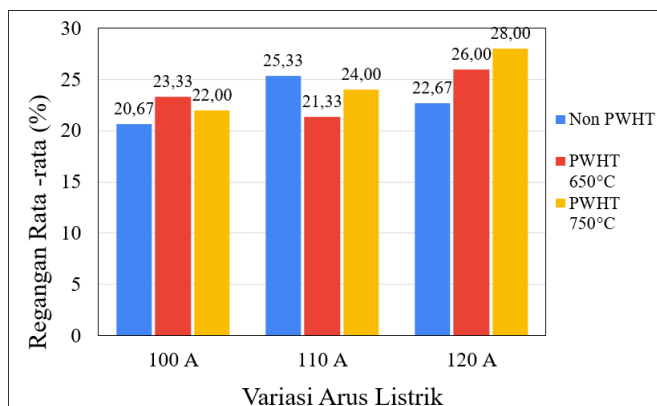
Variasi PWHT 650°C dengan arus 110 A terjadi penurunan tegangan tarik yang cukup besar dibandingkan variasi lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa hubungan antara arus pengelasan dan kekuatan tarik tidak selalu bersifat linier. Penurunan tersebut dapat disebabkan oleh kombinasi *heat input* dan temperatur PWHT yang belum menghasilkan kondisi pelepasan tegangan sisa secara optimal. Akibatnya, distribusi tegangan selama pembebanan menjadi kurang merata sehingga kemampuan spesimen dalam menahan beban maksimum menurun.

Variasi PWHT 750°C peningkatan tegangan tarik berlangsung lebih konsisten pada setiap kenaikan arus. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur PWHT yang lebih tinggi lebih efektif dalam mengurangi tegangan sisa hasil pengelasan sehingga sambungan memiliki kemampuan menahan beban yang lebih baik. Dengan demikian, kombinasi PWHT 750°C dan arus 120 A merupakan parameter yang paling efektif dalam meningkatkan kekuatan tarik pada penelitian ini.

3.3.2. Regangan Tarik

Tabel 4. Data Hasil Pengujian Regangan Tarik

SPEKIMEN	ΔL mm	L0 mm	Regangan ϵ (%)	SD	Regangan Rata-rata ϵ (%)
Non PWHT– 100 A	10	50	20,00	1,15	20,67
	10	50	20,00		
	11	50	22,00		
650°C – 100 A	11	50	22,00	1,15	23,33
	12	50	24,00		
	12	50	24,00		
750°C – 100 A	12	50	24,00	2,00	22,00
	10	50	20,00		
	11	50	22,00		
Non PWHT– 110 A	12	50	24,00	2,30	25,33
	12	50	24,00		
	14	50	28,00		
650°C – 110 A	11	50	22,00	1,15	21,33
	11	50	22,00		
	10	50	20,00		
750°C – 110 A	13	50	26,00	2,00	24,00
	11	50	22,00		
	12	50	24,00		
Non PWHT– 120 A	11	50	22,00	1,15	22,67
	12	50	24,00		
	11	50	22,00		
650°C – 120 A	14	50	28,00	2,00	26,00
	12	50	24,00		
	13	50	26,00		
750°C – 120 A	15	50	30,00	2,00	28,00
	13	50	26,00		
	14	50	28,00		



Gambar 13. Diagram Regangan Tarik

Berdasarkan tabel 4 dan gambar 13, nilai regangan menunjukkan perbedaan pada setiap variasi arus pengelasan dan perlakuan PWHT. Pada spesimen tanpa PWHT, nilai regangan sebesar 20,67% pada arus 100 A, meningkat menjadi 25,33% pada arus 110 A, kemudian menurun menjadi 22,67% pada arus 120 A. Pada spesimen PWHT 650°C, nilai regangan sebesar 23,33% pada arus 100 A, menurun menjadi 21,33% pada arus 110 A, kemudian meningkat menjadi 26,00% pada arus 120 A. Sementara itu, spesimen PWHT 750°C menunjukkan peningkatan yang bertahap, yaitu 22,00% pada arus 100 A, 24,00% pada arus 110 A, dan mencapai nilai tertinggi sebesar 28,00% pada arus 120 A. Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai regangan pada setiap variasi arus dan PWHT mengalami kecenderungan yang berbeda, dengan nilai regangan tertinggi diperoleh pada variasi PWHT 750°C dengan arus 120 A, sedangkan nilai regangan terendah diperoleh pada spesimen tanpa PWHT dengan arus 100 A.

Nilai regangan menunjukkan kemampuan material mengalami deformasi plastis sebelum mengalami perpatahan. Semakin tinggi nilai regangan maka semakin besar kemampuan material mengalami pemanjangan ketika menerima beban tarik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian PWHT secara umum meningkatkan kemampuan deformasi dibandingkan spesimen tanpa PWHT karena perlakuan panas membantu mengurangi tegangan sisa yang terbentuk selama proses pengelasan.

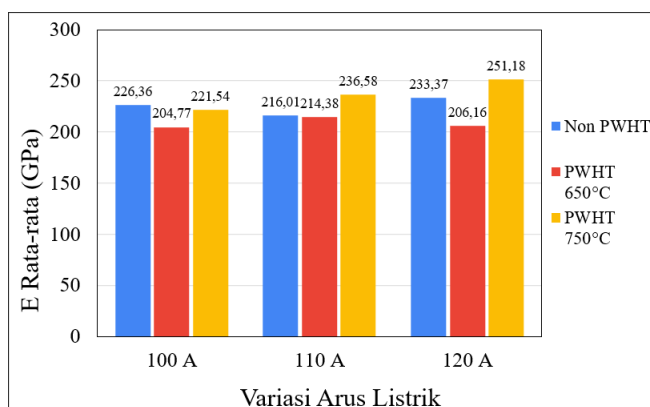
Fluktuasi regangan pada variasi PWHT 650°C menunjukkan bahwa pengaruh PWHT tidak hanya bergantung pada temperatur, tetapi juga dipengaruhi oleh besarnya arus pengelasan. Penurunan regangan pada arus 110 A mengindikasikan bahwa kombinasi parameter tersebut belum menghasilkan kondisi yang optimum sehingga kemampuan deformasi material menurun. Sebaliknya, peningkatan regangan hingga 28% pada PWHT 750°C arus 120 A menunjukkan bahwa kombinasi parameter tersebut memberikan keseimbangan yang lebih baik antara kekuatan sambungan dan kemampuan deformasi plastis.

Analisis ini juga menunjukkan bahwa peningkatan tegangan tarik pada variasi PWHT 750°C masih diikuti oleh peningkatan regangan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan kekuatan sambungan tidak menyebabkan material kehilangan keuletannya secara signifikan, sehingga sambungan memiliki kemampuan menahan beban sekaligus mengalami deformasi sebelum patah.

3.3.3. Modulus Elastisitas

Tabel 5 Data Hasil Modulus Elastisitas

SPESEMEN	σ Yield Stress (MPa)	ϵ Regangan Yield (%)	E (GPa)	SD	E Rata-rata (GPa)
Non PWHT– 100 A	307,70	0,136	226,25	2,40	226,36
	329,51	0,144	228,82		
	327,07	0,146	224,02		
650°C – 100 A	297,55	0,144	206,63	2,18	204,77
	299,51	0,148	202,37		
	291,56	0,142	205,32		
750°C – 100 A	329,15	0,150	219,44	3,16	221,54
	325,61	0,148	220,01		
	324,26	0,144	225,18		
Non PWHT– 110 A	343,29	0,158	217,27	1,21	216,01
	349,74	0,162	215,89		
	330,88	0,154	214,86		
650°C – 110 A	321,80	0,150	214,53	1,45	214,38
	280,97	0,132	212,85		
	332,24	0,154	215,74		
750°C – 110 A	357,43	0,150	238,29	1,61	236,58
	302,54	0,128	236,36		
	315,04	0,134	235,10		
Non PWHT– 120 A	352,46	0,150	234,98	2,30	233,37
	407,84	0,174	234,36		
	309,18	0,134	230,73		
650°C – 120 A	359,23	0,176	204,11	3,19	206,16
	384,52	0,188	204,53		
	377,69	0,180	209,83		
750°C – 120 A	384,65	0,154	249,77	1,50	251,18
	358,92	0,142	252,76		
	346,39	0,138	251,00		



Gambar 14. Diagram Modulus Elastisitas

Berdasarkan tabel 5 dan gambar 14, nilai modulus elastisitas menunjukkan variasi pada setiap kombinasi arus pengelasan dan perlakuan PWHT. Pada spesimen tanpa PWHT, nilai modulus elastisitas berubah dari 226,36 GPa (100 A) menjadi 216,01 GPa (110 A) dan meningkat menjadi 233,37 GPa (120 A). Pada spesimen PWHT 650°C, nilai modulus elastisitas berturut-turut sebesar 204,77 GPa, 214,38 GPa, dan 206,16 GPa untuk arus 100 A, 110 A, dan 120 A. Sementara itu, pada spesimen PWHT 750°C, nilai modulus elastisitas meningkat dari 221,54 GPa pada arus 100 A menjadi 236,58 GPa pada arus 110 A dan mencapai nilai tertinggi sebesar 251,18 GPa pada arus 120 A. Secara umum, variasi arus pengelasan dan PWHT memberikan perbedaan terhadap tingkat kekakuan material.

Modulus elastisitas menunjukkan tingkat kekakuan material pada daerah elastis. Nilai yang tinggi menunjukkan bahwa material memerlukan tegangan yang lebih besar untuk menghasilkan regangan elastis tertentu. Perbedaan nilai modulus pada penelitian ini menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan dan PWHT memengaruhi respons elastis sambungan las.

Nilai modulus yang relatif tinggi pada spesimen tanpa PWHT menunjukkan bahwa sambungan masih memiliki tingkat kekakuan yang lebih besar akibat masih adanya tegangan sisa hasil pengelasan. Setelah dilakukan PWHT, sebagian tegangan sisa berkurang sehingga kekakuan material berubah. Hal ini terlihat dari perubahan nilai modulus pada setiap variasi temperatur PWHT.

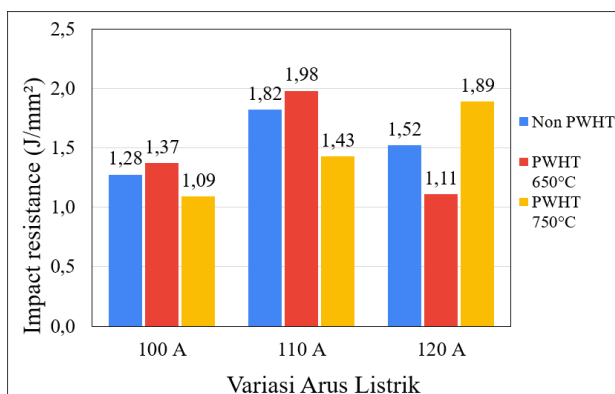
Perubahan modulus elastisitas yang tidak selalu meningkat seiring kenaikan arus menunjukkan bahwa sifat elastis material dipengaruhi oleh interaksi antara *heat input* dan perlakuan panas. Dengan demikian, peningkatan arus pengelasan tidak secara langsung meningkatkan kekakuan material, tetapi bergantung pada efektivitas PWHT dalam menstabilkan sifat mekanik sambungan. Oleh karena itu, variasi PWHT 750°C menunjukkan respons elastis yang lebih konsisten dibandingkan variasi lainnya.

3.4. Hasil Pengujian Impak

Pengujian impak dilakukan berdasarkan standar ASTM E23 pada tanggal 21 Januari 2026 di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro, Semarang.

Tabel 6. Data Hasil Pengujian Impak

SPESIMEN	Luas (mm ²)	Energi (J)	Harga Impak (J/mm ²)	SD	Rata-Rata Harga Impak (J/mm ²)
Non PWHT– 100 A	96,96	127	1,31	0,03	1,28
	101,85	130	1,28		
	99,19	123	1,24		
650°C – 100 A	92,92	130	1,40	0,04	1,37
	101,52	135	1,33		
	98,94	137	1,38		
750°C – 100 A	95,68	104	1,09	0,03	1,09
	97,97	110	1,12		
	101,37	108	1,07		
Non PWHT– 110 A	98,88	184	1,86	0,04	1,82
	104,76	186	1,78		
	98,94	181	1,83		
650°C – 110 A	97,37	189	1,94	0,04	1,98
	96,72	195	2,02		
	96,90	192	1,98		
750°C – 110 A	95,88	135	1,41	0,03	1,43
	95,55	139	1,45		
	100,44	142	1,41		
Non PWHT– 120 A	101,65	152	1,50	0,02	1,52
	101,85	155	1,52		
	101,92	157	1,54		
650°C – 120 A	97,52	106	1,09	0,02	1,11
	100,28	113	1,13		
	96,82	108	1,12		
750°C – 120 A	99,96	188	1,88	0,04	1,89
	99,84	193	1,93		
	102,82	190	1,85		



Gambar 15. Diagram Harga Impak

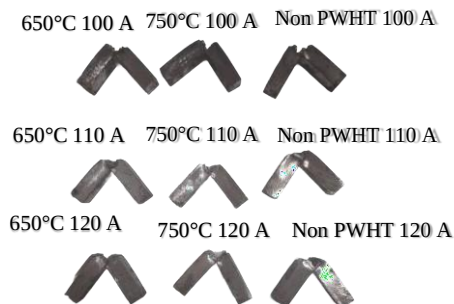
Berdasarkan tabel 6 dan gambar 15 hasil pengujian impak, nilai rata-rata harga impak menunjukkan perbedaan pada setiap variasi arus pengelasan dan perlakuan PWHT. Pada spesimen tanpa PWHT, nilai impak meningkat dari 1,28 J/mm² pada arus 100 A menjadi 1,82 J/mm² pada arus 110 A, kemudian menurun menjadi 1,52 J/mm² pada arus 120 A. Pada spesimen PWHT 650°C, nilai impak meningkat dari 1,37 J/mm² menjadi 1,98 J/mm² pada arus 110 A, namun menurun menjadi 1,11 J/mm² pada arus 120 A. Sementara itu, pada spesimen PWHT 750°C, nilai impak meningkat secara bertahap dari 1,09 J/mm² pada arus 100 A menjadi 1,43 J/mm² pada arus 110 A dan 1,89 J/mm² pada arus 120 A. Secara keseluruhan, nilai impak tertinggi diperoleh pada PWHT 650°C dengan arus 110 A, sedangkan nilai terendah diperoleh pada PWHT 750°C dengan arus 100 A.

Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan dan temperatur PWHT tidak selalu meningkatkan ketangguhan secara linier, sehingga terdapat kombinasi parameter optimum yang menghasilkan kemampuan penyerapan energi benturan paling baik. Nilai impak tertinggi tidak diperoleh pada temperatur PWHT tertinggi, tetapi pada PWHT 650°C arus 110 A. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan temperatur PWHT maupun arus pengelasan tidak selalu menghasilkan peningkatan ketangguhan secara linier. Pada kondisi tertentu, kombinasi parameter yang terlalu tinggi justru dapat menurunkan kemampuan material menyerap energi benturan sehingga setiap parameter memiliki kondisi optimum masing-masing.

Penurunan nilai impak pada PWHT 650°C arus 120 A menunjukkan bahwa peningkatan *heat input* tidak selalu diikuti oleh peningkatan ketangguhan. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kombinasi parameter pengelasan yang belum optimum sehingga kemampuan material menyerap energi benturan menjadi lebih rendah. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan arus pengelasan dan temperatur PWHT harus disesuaikan dengan sifat mekanik yang ingin diutamakan, karena setiap kombinasi parameter memberikan karakteristik kekuatan dan ketangguhan yang berbeda.

Apabila dibandingkan dengan hasil uji tarik, terlihat bahwa spesimen dengan kekuatan tarik tertinggi (PWHT 750°C 120 A) tidak menghasilkan nilai impak tertinggi. Kondisi ini menunjukkan adanya *trade-off* antara kekuatan tarik dan ketangguhan, di mana peningkatan kekuatan sambungan belum tentu diikuti oleh

peningkatan kemampuan menyerap energi benturan. Oleh karena itu, pemilihan parameter pengelasan sebaiknya disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi. Jika prioritasnya adalah kekuatan tarik maka kombinasi PWHT 750°C–120 A lebih sesuai, sedangkan apabila ketangguhan terhadap beban kejut lebih diutamakan maka kombinasi PWHT 650°C–110 A menjadi pilihan yang lebih baik.



Gambar 16. Spesimen Setelah Pengujian Impak

Gambar 16 menunjukkan spesimen impak yang telah dilakukan pengujian impak

3.5. Perbandingan Hasil Uji Dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan hingga 120 A meningkatkan kekuatan tarik, dengan nilai tertinggi 434,10 MPa pada spesimen PWHT 750°C. Sementara itu, PWHT 750°C meningkatkan regangan dan keuletan material, sedangkan ketangguhan impak terbaik diperoleh pada PWHT 650°C dengan arus 110 A sebesar 1,98 J/mm².

Hasil tersebut sejalan dengan penelitian lain yang menunjukkan bahwa variasi arus dan PWHT sangat memengaruhi sifat mekanik hasil las. Penelitian pada baja ST 37 metode MIG menunjukkan arus optimum meningkatkan kekuatan tarik, sedangkan panas berlebih menurunkannya [17]. Penelitian lain juga menyatakan bahwa PWHT dapat menurunkan kekuatan tarik tetapi meningkatkan ketangguhan, keuletan, dan sifat ductile material akibat berkurangnya tegangan sisa serta perubahan struktur mikro [18] [19] [20].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi arus listrik dan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap kekuatan tarik dan impak pada pengelasan SMAW baja ST 60, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Variasi arus pengelasan 100 A, 110 A, dan 120 A memengaruhi sifat mekanik sambungan las

baja ST 60. Secara umum, peningkatan arus cenderung meningkatkan kekuatan tarik, sedangkan nilai impak tidak meningkat secara linier pada seluruh kondisi PWHT.

2. Variasi PWHT tanpa perlakuan, 650°C, dan 750°C memberikan pengaruh berbeda terhadap sifat mekanik sambungan las. PWHT 750°C cenderung memberikan hasil sifat tarik yang lebih baik, sedangkan PWHT 650°C memberikan ketangguhan impak yang lebih tinggi.
3. Kombinasi parameter terbaik bergantung pada sifat mekanik yang diprioritaskan. Untuk sifat tarik, arus 120 A dengan PWHT 750°C menghasilkan nilai tertinggi, yaitu tegangan tarik 434,10 MPa, regangan 28,00%, dan modulus elastisitas 251,18 GPa. Untuk ketangguhan impak, arus 110 A dengan PWHT 650°C menghasilkan nilai tertinggi sebesar 1,98 J/mm².

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Pagare, D. Awati, S. Mane, V. Teli, and A. Bhandare, "Investigating the Effects of Welding Parameters on Mild Steel by SMAW Technique," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/998/1/012052.
- [2] P. K. Baghel, "Effect of SMAW Process Parameters on Similar and Dissimilar Metal Welds: An overview," Dec. 01, 2022, *Elsevier Ltd*. doi:10.1016/j.heliyon.2022.e1261.
- [3] L. D. J. Jorge *et al.*, "Mechanical properties and Microstructure of SMAW Welded and Thermically Treated HSLA-80 Steel," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 598–605, 2018, doi: 10.1016/j.jmrt.2018.08.007.
- [4] M. F. Hilaqil S, W. Amiruddin, and Kiryanto, "Analisis Pengaruh Durasi Post Weld Heat Treatment Annealing pada Pengelasan GMAW Baja ST60 terhadap Kekuatan Uji Tarik, Uji Impak, Uji Bending dan Struktur Mikro," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 12, no. 3, 2024, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>.
- [5] A. F. Arfiansyah and A. H. A. Rasyid, "Analisis Pengaruh Variasi Arus pada Pengelasan SMAW Baja ST 60 terhadap Kekuatan Tarik dan Porositas," *Jurnal Teknik Mesin*, no. 53–58, 2023.

- [6] M. Fitri, P. Hidayatullah, K. M. Wibowo, and A. S. Darmawan, "The Effect of SMAW Welding Currents on Mechanical Properties and Micro structures of Low Carbon Steels," in *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2021, pp. 15-23. doi:10/4028/www.scientific.net/MSF.1029.15
- [7] T. Budi Santoso and P. Tri Hutomo, "Pengaruh Kuat Arus Listrik dan Pengelasan terhadap Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Las SMAW dengan Elektroda E7016," no. 1, Apr. 2023.
- [8] D. Prayitno, H. Daniel Hutagalung, and D. P. Aji, "Pengaruh Kuat Arus Listrik Pengelasan terhadap Kekerasan Lapisan pada Baja ASTM A1316," [Online]. Available: <https://journal.uny.ac.id/index.php/dynamika/issue/view/1521>
- [9] D. Martdiansyah and S. Lubis, "Pengaruh Variasi Post Weld Heat Treatment (Pwht) terhadap Sifat Mekanik Baja Aisi 1045 Hasil Pengelasan GMAW," *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, vol. 13, no. 2, pp. 178–184, Aug. 2025, doi:10.23887/jptm.v13i2.96072.
- [10] M. Nafi and I. Wahid, "Analisis Kekerasan dan Struktur Mikro Baja ST 60 Hasil Pengelasan SMAW dengan Variasi Arus Las dan Temperatur PWHT," *JIMPS: Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pendidikan Sejarah*, vol. 8, no. 4, doi: 10.24815/jimps.v8i4.26902.
- [11] J. M. Routley, "Tensile testing basics," *Quality*, vol. 45, no. 13, 2006.
- [12] B. I. G. Sembiring, U. Budiarto, and P. Manik, "Analisis Pengaruh Variasi Kuat Arus Listrik dan Posisi Pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW) terhadap Kekuatan Material Baja Karbon Sedang," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. XX, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>.
- [13] ASTM International, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, United States: ASTM International, 2013, hlm. 1–28. doi: 10.1520/E0008_E0008M-13A
- [14] ASTM International, Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohocken, PA, United States: ASTM International, 2016, hlm. 1–26. doi: 10.1520/E0023-16B
- [15] G. K. Kiran Kumar, "Experimental Investigation of Rockwell Hardness and Charpy Impact Test of Tungston Inert Gas (TIG) Welded Joint of Duplex Stainless Steel-2205 Specimen," *International Journal of Scientific Research in Mechanical and Materials Engineering © 2018 IJSRMME*, vol. 2, no. 4, pp. 15–20, 2018 [Online]. Available: www.ijsrmme.com
- [16] S. R. Ahmed, L. A. Agarwal, and B. S. S. Daniel, "Effect of Different Post Weld Heat Treatments on the Mechanical Properties of Cr-Mo Boiler Steel Welded with SMAW Process," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 1059–1066. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.002.
- [17] A. R. Burmawi, "Pengaruh Kuat Arus Pengelasan terhadap Kekuatan Tarik Baja Karbon ST 37 Menggunakan Metal Inert Gas," Dec. 2020.
- [18] R. R. Otmani and M. Hakem, "Effects of Welding and the PWHT on the Mechanical Properties of API 5L GrX70 Steel," 2020.
- [19] F. Wahyu Pribadi and N. Sukma Drastiawati, "Pengaruh Variasi Temperatur dalam Proses PWHT Pengelasan SMAW untuk Material Baja SS400 terhadap Nilai Kekuatan Tarik dan Kekuatan Impak," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 17-22, 2024.
- [20] P. Zirwatul, N. M. Zamanhuri, N. Khalid, and A. A. Daud, "Effects of Post Weld Heat Treatment on Hardness Value of A36 Carbon Steel Welded Joints by Shielded Metal Arc Welding," vol. 12, no. 4, 2017, [Online]. Available: www.arpjournals.com