



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Pengaruh Durasi *Post Weld Heat Treatment Annealing* Pada Pengelasan GMAW Baja ST60 Terhadap Kekuatan Uji Tarik, Uji IMPak, Uji Bending dan Struktur Mikro

Muhammad Hilaqil F S¹⁾, Wilma Amiruddin²⁾, Kiryanto³⁾

¹⁾Laboratorium Teknologi Material dan Produksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

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

Abstrak

GMAW atau Gas Metal Arc Welding adalah metode pengelasan yang menggunakan busur listrik untuk melelehkan logam yang akan disatukan dengan bantuan gas pelindung untuk melindungi daerah las dari kontaminasi. Baja ST60 merupakan jenis baja karbon sedang dengan kandungan karbon sebesar 0,48-0,55% yang penggunaannya relevan dengan industri perkapalan saat ini, namun dalam proses pengelasan baja karbon sedang seperti baja ST60 ini sering mengalami permasalahan struktural dan pada sifat mekanis akibat perubahan suhu yang cepat dan distribusi panas yang tidak merata. Permasalahan tersebut dapat diminimalisir dengan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT), yang berfungsi untuk mengurangi tegangan residual, meningkatkan ketahanan korosi, dan memperbaiki sifat mekanis logam. Hasil yang didapat dari penelitian ini menunjukkan bahwa pada pengujian tarik, tegangan tarik maksimum tertinggi didapatkan oleh spesimen dengan perlakuan PWHT selama 1 jam dengan nilai sebesar 627 MPa, sedangkan nilai regangan tarik terbesar didapat oleh spesimen dengan perlakuan PWHT selama 3 jam dengan nilai rata-rata regangan sebesar 6%, untuk nilai modulus elastisitas terbesar didapat oleh spesimen dengan perlakuan PWHT selama 1 jam dengan nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 97,2 GPa. Pengujian iMPak didapatkan spesimen dengan nilai ketangguhan iMPak tertinggi yakni oleh spesimen dengan perlakuan PWHT 3 jam dengan nilai rata-rata 1,21 J/mm². Pengujian bending didapatkan spesimen dengan nilai tegangan tekuk tertinggi pada PWHT 1 jam dengan nilai rata-rata sebesar 713,83 MPa. Pengamatan struktur mikro didapatkan spesimen dengan perlakuan PWHT 3 jam membentuk butiran ferrite dan pearlit yang paling rapi dan rapat pada daerah base metal, HAZ, dan weld metal.

Kata Kunci : Baja ST 60, GMAW, PWHT, Kekuatan Mekanis, Struktur Mikro

1. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan sebuah metode untuk penyatuan logam atau bahan, yang melibatkan pemanasan material yang akan dihubungkan hingga mencapai suhu las yang sesuai. Proses ini dilakukan dengan menerapkan tekanan pada material tersebut. Namun dalam prosesnya, perubahan suhu yang cepat dan distribusi panas yang tidak merata dapat menyebabkan berbagai masalah struktural dan sifat mekanis pada material yang dihasilkan.

Permasalahan struktural dan sifat mekanis yang terjadi akibat proses pengelasan tersebut dapat diatasi dengan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) berfungsi untuk mengurangi tegangan residual, meningkatkan ketahanan korosi, dan memperbaiki sifat mekanis logam [1]. Salah satu logam yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi adalah baja ST60. Baja ST 60 memiliki karakteristik mekanis yang relevan, termasuk kekuatan yang baik dan ketangguhan, sehingga sering digunakan sebagai bahan konstruksi perkapalan. Baja ST60 merupakan jenis baja

karbon sedang dengan kandungan karbon sebesar 0,48-0,55%[2]. Diantara berbagai macam proses pengelasan, metode pengelasan yang akan digunakan dalam penelitian adalah proses GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). GMAW sendiri merupakan jenis proses pengelasan yang menggunakan elektroda gulungan berupa kawat las yang diuMPankan secara terus-menerus dan gas pelindung yang berupa gas mulia, yaitu 97% argon untuk pelat tipis dan 100% helium untuk pelat tebal yang fungsinya untuk melindungi las dari pengaruh udara luar yang dapat mempengaruhi kualitas las[3]

Beberapa penelitian juga telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap perubahan suatu material. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Nafi, mengenai pengaruh variasi arus las sebesar 140 ampere, 150 ampere, dan 160 ampere serta variasi temperatur PWHT 400°C, 450°C, dan 500°C terhadap kekerasan dan struktur mikro Baja ST 60 dengan pengelasan SMAW. Didapatkan bahwa peningkatan temperatur dalam Post Weld Heat Treatment (PWHT) memiliki daMPak negatif terhadap nilai kekerasan[4]. Temuan lainnya yang diungkapkan oleh Wurdhani mengenai *heat treatment normalizing* terhadap kekuatan iMPak Aluminium 6061 pengelasan MIG dengan variasi bentuk kampuh serta posisi, didapatkan bahwa PWHT dapat meningkatkan kekuatan iMPak pada specimen, dengan nilai iMPak tertinggi yang didapatkan dari heat treatment normalizing pada temperature 415°C sebesar 0.457 J/mm²[5]

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan untuk memahami pengaruh PWHT pada sifat mekanis dan struktur mikro baja, ada kebutuhan untuk penelitian lebih lanjut yang fokus pada variasi durasi PWHT. Variasi durasi PWHT dapat mempengaruhi sifat material dengan cara yang signifikan, dan ini bisa memiliki implikasi penting dalam desain dan keandalan struktur yang menggunakan baja ST60 yang dilas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh berbagai durasi PWHT pada pengelasan GMAW baja ST60 terhadap sifat-sifat mekanis seperti uji tarik, uji iMPak, dan uji bending, serta analisis struktur mikro.

2. METODE

2.1 Persiapan Spesimen

Material baja ST 60 menjadi objek yang diteliti, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Baja ST 60 secara umum diklasifikasikan sebagai baja karbon menengah yang memiliki kandungan karbon pada besi berkisar antara 0,3% C hingga 0,59% C. Baja ini memiliki titik didih sekitar 1550°C dan titik lebur mencapai 2900°C. Dikenal

juga sebagai baja keras, jenis baja ini sering digunakan secara luas dalam pembuatan tangki, perkapalan, jembatan, dan proses permesinan. Secara spesifik, di dunia perkapalan baja ST60 banyak digunakan sebagai material poros propeller. Secara spesifik, komposisi Baja ST 60 memiliki kadar karbon sebesar 0,5%, dengan rincian karbon sebesar 0,55%, fosfor 0,006%, belerang 0,011%, dan silikon 0,142% [6].



Gambar 1. Baja ST 60

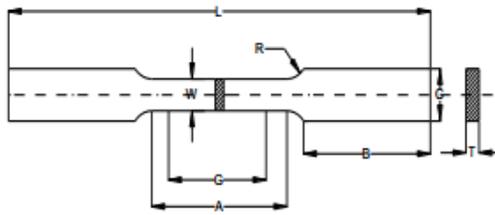
Pengelasan atau disebut juga *welding*, merujuk pada teknik penyambungan logam yang melibatkan peleburan sebagian dari logam asal dan logam tambahan, dengan ataupun tanpa penggunaan tekanan, serta bisa melibatkan logam tambahan. Metode ini memungkinkan pembuatan sambungan yang lebih lanjut. Dalam konteks definisi dari Deutche Industrie Normen (DIN), pengelasan dapat dijelaskan sebagai proses metalurgi yang menghasilkan ikatan pada sambungan logam atau paduan logam dalam kondisi leleh atau cair.

Teknik pengelasan dalam penelitian ini menggunakan pengelasan GMAW atau *Gas Metal Arc Welding*, yaitu metode pengelasan listrik yang menggunakan busur listrik yang dihasilkan dari elektroda yang terus-menerus dipasok dari sebuah mekanisme ke dalam kolam las. Elektroda, berupa gulungan kawat atau rol, didorong oleh motor listrik. Proses pengelasan ini di laksanakan di INLASTEK Solo dengan detail sebagai berikut:

- a. Gas Pelindung : Gas Argon
- b. Jenis Elektroda : ER70S-6
- c. Logam Induk : Baja ST60
- d. Diameter Elektroda : 0,9 mm
- e. Kuat Arus (I) : 130 – 195 A
- f. Tegangan (E) : 20 - 25 V

Pemotongan material untuk spesimen dilakukan setelah proses pengelasan usai. Pengujian yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini mencakup uji tarik, uji iMPak, uji bending, dan uji struktur mikro. Pada tahap awal, mengukur dimensi untuk setiap jenis pengujian, kemudian material dipotong. Plat dipotong dahulu

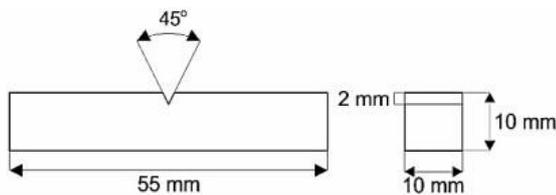
menggunakan gerinda agar sesuai dengan standar spesimen uji. Pembuatan ketiga spesimen tersebut mengikuti ketentuan yang telah ditetapkan dalam standar ASTM E8, ASTM E23, dan JIH Z2248. Standar yang dimaksud ditunjukkan pada Gambar 2, 3 dan 4.



Gambar 2. Dimensi Spesimen Uji Tarik

Keterangan :

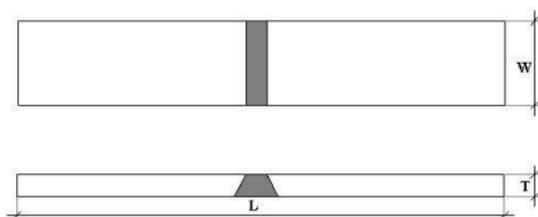
Gage length (G)	: 50 mm
Radius of fillet (R)	: 12,5 mm
Length of reduced section (A)	: 57 mm
Overall length (L)	: 200 mm
Width (W)	: 12,5 mm
Width of grip section (C)	: 20 mm
Thickness (T)	: 10 mm
Length of grip section (B)	: 50 mm



Gambar 3. 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 4. Spesimen Uji Bending

Keterangan :

Overall length (L)	: 150 mm
Width (W)	: 30 mm
Thickness (T)	: 10 mm

Proses pemanasan material baja secara umum dikenal sebagai Post Weld Heat Treatment (PWHT). Proses ini melibatkan pemanasan kembali material dalam tungku furnace dengan

suhu yang dapat digunakan pada baja karbon atau baja paduan yakni antara 550 °C hingga 650 °C[7]. Durasi penahanan yang diberikan selama 1, 2, dan 3 jam, mengacu pada penelitian sebelumnya, mengenai pengaruh variasi temperature dan waktu tunggu pada PWHT material Bisclad 600 dengan metode SMAW terhadap struktur mikro, dimana didapatkan perlit dan dua karbida hasil transformasi *isothermal* dengan jenis yang sama pada *base metal* dan daerah HAZ[8]. Akibat dari pemanasan dan pendinginan ini, material mengalami perubahan struktur dan grain. Struktur yang tidak homogen dapat menyMPan tingginya tingkat tegangan sisa, yang pada gilirannya membuat material memiliki sifat yang lebih keras namun dengan ketangguhan yang lebih rendah dan tingkat keuletan yang lebih tinggi.

Proses PWHT memiliki beberapa jenis perlakuan panas, yang digunakan dalam penelitian ini ialah annealing, dimana proses tersebut dilakukan untuk memperbaiki tingkat keuletan dan menurunkan tegangan tarik[9]. Proses annealing melibatkan langkah-langkah tertentu untuk meningkatkan sifat material. Pertama-tama, material dipanaskan dalam furnace hingga mencapai suhu yang ditentukan. Kemudian, material dipertahankan pada suhu tersebut selama durasi tertentu. Setelah itu, pendinginan dilakukan di dalam furnace hingga mencapai suhu ruangan dengan cara mematikan furnace (furnace cooled). Proses PWHT *Annealing* dalam penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Pengelasan Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro (UNDIP).

2.2 Pengujian Mekanis

Pengujian tarik ialah metode pengujian merusak yang dilakukan untuk menganalisis sifat mekanis logam dan paduannya. Dalam pengujian tarik, beban diterapkan secara berkelanjutan dengan peningkatan bertahap dalam beban tersebut[10]. Hasil yang didapat dari pengujian tarik mencakup kurva regangan, tegangan, parameter kekuatan, dan perubahan fisik pada material, termasuk perubahan bentuk dan peningkatan panjang material. Pengujian ini memiliki fungsi untuk mengetahui tingkat kekuatan suatu material dan untuk mengenali karakteristik pada material tersebut. Berikut ialah sifat-sifat yang dihasilkan oleh pengujian tarik.

1. Tegangan tarik maksimum (σ)

Tegangan tarik maksimum merupakan tingkat tegangan yang dapat ditahan oleh suatu material sebelum terjadi kegagalan atau kerusakan struktural. Kekuatan tarik maksimum dari suatu bahan dapat dilihat pada rumus (1) berikut:

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

- F : Gaya (N)
- A : Luas penampang (mm²)
- σ : Tegangan (N/mm²)

2. Regangan tarik (*e*)

Regangan tarik maksimum mengacu pada penambahan panjang terbesar yang dapat dicapai oleh suatu material sesuai menjalani uji tarik. Regangan ini mengukur seberapa banyak material tersebut memanjang dari panjang asalnya sebelum terjadi perpatahan, dapat dilihat pada rumus (2) berikut:

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

- e* = Regangan (%)
- ΔL = Perubahan panjang (mm)
- L_0 = Panjang mula-mula (mm)

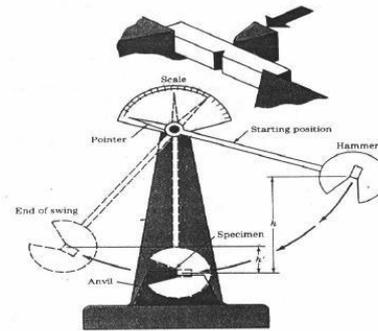
3. Modulus Elastisitas (*E*)

Modulus elastis merupakan ukuran kekakuan pada material dalam grafik tegangan-regangan, dapat dilihat pada rumus (3) berikut:

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

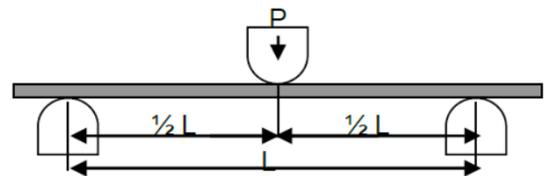
- E* = Modulus Elastisitas (GPa)
- σ = Tegangan maksimum (MPa)
- e* = Regangan (%)

Pengujian iMPak bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan spesimen dalam menyerap energi yang diberikan. Prosedur ini adalah salah satu metode untuk menilai sifat kerapuhan material. Melalui pengujian iMPak, kekuatan material dalam menghadapi beban mendadak dapat diidentifikasi, sekaligus mengungkap kelemahan pada sambungan las yang mungkin terjadi akibat perlakuan panas dan normalisasi. Pengujian dilakukan pada area las dan daerah HAZ dari material ST 60 dengan spesimen uji berukuran 10 mm x 10 mm x 55 mm dan takikan berbentuk V dengan sudut 45° serta kedalaman 2 mm di tengah. Metode Charpy digunakan dalam pengujian ini, di mana spesimen diteMPatkan secara horizontal pada tumpuan, dan arah pembebanan dilakukan berlawanan dengan arah takikan.



Gambar 5. Skema Pengujian Metode Charpy

Pengujian bending atau pengujian tekuk bertujuan untuk menilai kelenturan dari suatu benda uji. Prosedur pengujian ini melibatkan pemberian beban secara perlahan hingga benda uji mencapai titik tertentu. Dalam pengujian bending, bagian atas spesimen uji mengalami tekanan, sedangkan bagian bawahnya mengalami patah. Hal ini disebabkan oleh ketidakmampuan bagian bawah benda uji untuk menahan tegangan tarik.



Gambar 6. Metode *Three Point Bending*

Metode pengujian *Three Point Bending* melibatkan penggunaan dua titik tumpu dan satu beban yang diteMPatkan di tengah panjang spesimen uji. Penting untuk memosisikan beban pada spesimen uji dengan tepat di tengah panjangnya sehingga hasil yang diperoleh mencerminkan momen maksimum dari spesimen uji. Sifat yang dihasilkan pada pengujian bending sama seperti uji tarik.

2.3 Pengujian Mikrografi

Pengujian mikrografi bertujuan untuk mengevaluasi struktur mikro hasil pengelasan GMAW setelah melalui proses PWHT dan membandingkannya dengan struktur mikro sebelum perlakuan tersebut. Tahapan pengujian mikrografi meliputi pengamplasan spesimen uji, pemolesan, etching dengan larutan HNO₃ 3,25% yang dicampur dengan 75% alkohol, serta larutan aqua regia. Setelah itu, pengamatan dilakukan menggunakan mikroskop optik dan gambar diambil untuk analisis lebih lanjut.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Uji Tarik

Pengujian tarik melibatkan pengukuran tegangan tarik, regangan tarik dan modulus elastisitas, pada setiap spesimen. Proses ini melibatkan penggunaan gaya tarik yang diterapkan pada objek dari arah berlawanan dari tengahnya, atau dengan menjepit satu ujung objek dan menarik ujung lainnya sampai objek tersebut mengalami ruptur. Pengujian tarik ini dijalankan sesuai dengan standar ASTM E8.



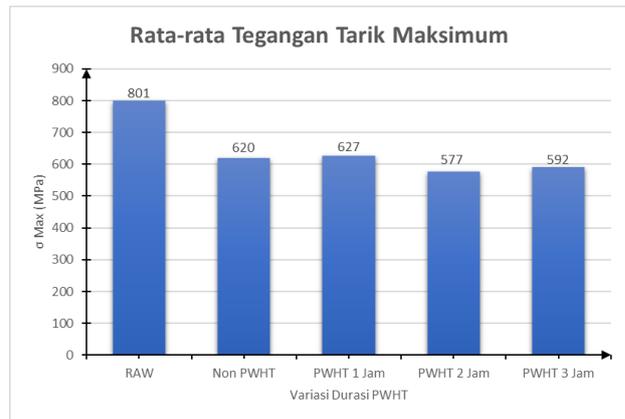
Gambar 7. Spesimen setelah pengujian tarik

1. Tegangan Tarik

Tegangan tarik merupakan tegangan maksimal yang dapat diterima oleh suatu material sebelum mengalami patah atau pecah. Berdasarkan hasil dari pengujian yang telah dilakukan diperoleh nilai maksimum tegangan tarik dari material ST 60 dengan variasi durasi PWHT *Annealing* seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.1:

Tabel 3.1 Nilai Tegangan Tarik

Spesimen	Area (mm)	P		σ		Standart Deviasi	σ Rata-rata (MPa)
		max	σ Max (MPa)	Rata-rata (MPa)	σ Rata-rata (MPa)		
PWHT 1 Jam	125	79.1	632.8	627	632.8	627	
	125	78.1	624.8		624.8		
	125	77.9	623.2		623.2		
PWHT 2 Jam	125	50.9	407.2	520.3	407.2	576.8	
	125	72.7	581.6		581.6		
	125	71.5	572		572		
PWHT 3 Jam	125	69.5	556	537.3	556	592	
	125	78.5	628		628		
	125	53.5	428		428		
Non PWHT	125	79.9	639.2	591.2	639.2	619.6	
	125	75	600		600		
	125	66.8	534.4		534.4		
RAW	125	96.1	768.8	801.3	768.8	801.3	
	125	100.6	804.8		804.8		
	125	103.8	830.4		830.4		



Gambar 8. Rata-rata Tegangan Tarik Maksimum

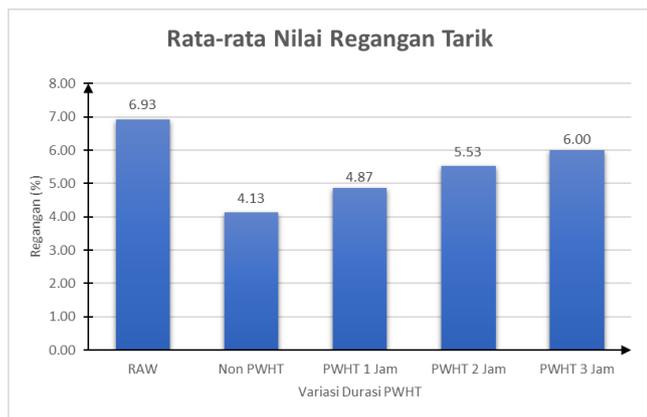
Berdasarkan tabel 3.1 dapat dilihat bahwa specimen yang mendapatkan kekuatan tarik tertinggi adalah specimen RAW dengan rata-rata 801,3 MPa. Sedangkan specimen yang mendapatkan nilai rata-rata kekuatan tarik paling rendah adalah specimen PWHT 2 jam dengan nilai rata-rata 577 MPa, untuk specimen dengan PWHT 1 jam mendapatkan nilai rata-rata tegangan sebesar 627 MPa, lebih baik dibandingkan specimen tanpa PWHT yang memiliki nilai rata-rata kekuatan tarik 620 MPa dan specimen dengan PWHT 3 jam dengan nilai rata-rata kekuatan tarik 592 MPa. Nilai kekuatan tarik dengan holding time yang berbeda-beda dapat dilihat perbedaannya pada gambar 8, dimana specimen RAW menunjukkan kualitas yang paling baik. Penurunan nilai tegangan tarik maksimum yang terjadi setelah diberi perlakuan PWHT terjadi akibat pelepasan tegangan sisa akibat perlakuan PWHT, sehingga nilai tegangan tarik yang didapat juga mengalami penurunan. Terdapat perbedaan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan pengujian tarik pada baja AISI 1045 dengan variasi waktu tunggu PWHT 15 menit, 30 menit, dan 45 menit, didapatkan nilai kekuatan tarik mengalami penurunan disetiap pertambahan waktu holding time yakni tanpa PWHT sebesar 469,13 MPa, PWHT 15 menit 444,56 MPa, PWHT 30 menit 432,47 MPa, dan PWHT 45 menit sebesar 421,87 MPa[7]. Perbandingan hasil yang telah didapat dengan penelitian sebelumnya mengenai PWHT pada baja karbon rendah SS400 dengan variasi temperatur yang berbeda juga dapat dikatakan selaras namun dengan perubahan yang lebih signifikan, dimana pada specimen tanpa PWHT mendapatkan nilai tegangan maksimum 456 MPa, specimen dengan PWHT 800°C sebesar 427 MPa, dan specimen dengan PWHT 850°C sebesar 411 MPa [11].

2. Regangan Tarik

Hasil tes menunjukkan nilai Regangan Tarik rata-rata seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.2 berikut :

Tabel 3.2 Data Hasil Regangan

Spesimen	ΔL	Lo	Regangan (%)	ϵ Rata-rata (%)
PWHT 1 Jam	2.4	50	4.8	4.9
	2.3	50	4.6	
	2.6	50	5.2	
PWHT 2 Jam	2.8	50	5.6	5.53
	2.6	50	5.2	
	2.9	50	5.8	
PWHT 3 Jam	2.8	50	5.6	6
	3	50	6	
	3.2	50	6.4	
Non PWHT	2.2	50	4.4	4.13
	2.1	50	4.2	
	1.9	50	3.8	
RAW	3.5	50	7	6.93
	3.3	50	6.6	
	2.1	50	7.2	



Gambar 9. Rata-rata Regangan Tarik

Berdasarkan data hasil pengujian plat baja ST60 yang dapat dilihat pada tabel 3.2 dan gambar 9, didapatkan spesimen dengan nilai regangan terbesar yakni pada spesimen RAW sebesar 6,93%, sementara untuk spesimen dengan PWHT 3 jam yang memiliki nilai regangan sebesar 6% lebih baik dibandingkan spesimen dengan PWHT 2 jam yang memiliki regangan sebesar 5,53% dan spesimen dengan perlakuan PWHT 1 jam yang memiliki nilai regangan sebesar 4,87%. Dari semua spesimen dengan perlakuan PWHT dengan durasi yang berbeda-beda, spesimen dengan nilai regangan terkecil dibanding spesimen lain adalah spesimen tanpa perlakuan PWHT dengan nilai regangan sebesar 4,13%. Kenaikan nilai regangan setelah diberi perlakuan PWHT dapat disebabkan oleh PWHT yang membantu mengurangi tegangan sisa yang terbentuk selama pengelasan, pengurangan tegangan sisa yang terjadi membuat material menjadi lebih mampu mengalami

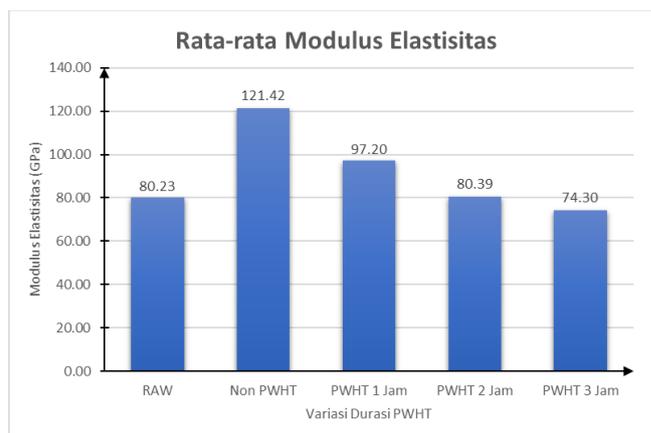
deformasi plastis sebelum patah, sehingga meningkatkan nilai regangannya.

3. Modulus Elastisitas

Hasil tes menunjukkan nilai Modulus Elastisitas rata-rata seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.3 berikut :

Tabel 3.3 Data Hasil Modulus Elastisitas

Spesimen	σ (MPa)	ϵ (%)	E (GPa)	Standart Deviasi	E Rata-rata (GPa)
PWHT 1 Jam	467	4.8	97.3	5.52	97.20
	478	4.6	103.9		
	470	5.2	90.4		
PWHT 2 Jam	384	5.6	68.6	9.46	80.39
	477	5.2	91.7		
	469	5.8	80.9		
PWHT 3 Jam	464	5.6	82.9	7.60	74.30
	454	6	75.7		
	412	6.4	64.4		
Non PWHT	497	4.4	113.0	7.56	121.42
	504	4.2	120.0		
	499	3.8	131.3		
RAW	493	7	70.4	8.16	80.23
	527	6.6	79.8		
	651	7.2	90.4		



Gambar 10. Rata-rata Modulus Elastisitas

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, dapat diketahui nilai dan perbandingan hasil dari tiap spesimen dengan perlakuan PWHT dengan durasi yang berbeda-beda pada tabel 3.3 dan gambar 10, didapatkan bahwa spesimen dengan nilai modulus elastisitas tertinggi dimiliki oleh spesimen tanpa perlakuan PWHT dengan nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 121,42 GPa. Nilai rata-rata modulus elastisitas pada spesimen dengan perlakuan PWHT 1 jam mendapatkan nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 97,2 GPa, diikuti oleh spesimen dengan PWHT 2 jam mendapatkan nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 80,39 GPa, kemudian diikuti spesimen RAW yang memperoleh nilai rata-rata modulus elastisitas sebesar 80,23 GPa. Sementara nilai rata-rata modulus elastisitas terkecil dimiliki oleh spesimen

dengan PWHT 3 jam yang memiliki nilai rata-rata 74,3 GPa.

3.2. Hasil Uji IMPak

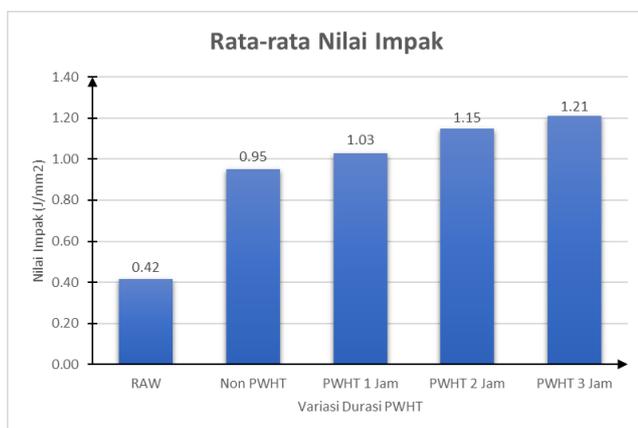
Pengujian IMPak dikerjakan untuk mendapatkan nilai ketangguhan dari hasil PWHT material baja ST 60. Pengujian ini dilakukan menggunakan standar ASTM E23



Gambar 11. Spesimen setelah dilakukan uji iMPak

Tabel 3.4 Data Hasil Uji IMPak

Spesimen	Energi Terserap (J)	Luas (mm ²)	Nilai IMPak (J/mm ²)	Rata-rata (J/mm ²)
PWHT 1 Jam	114	103	1.1	1.03
	101	102.5	1.0	
	105	105	1.0	
PWHT 2 Jam	126	106	1.2	1.15
	120	103.3	1.2	
	114	104	1.1	
PWHT 3 Jam	130	107.5	1.2	1.21
	126	105	1.2	
	125	103.5	1.2	
Non PWHT	100	102.5	1.0	0.95
	92	102	0.9	
	98	100	1.0	
RAW	48	104.6	0.5	0.42
	48	108.5	0.4	
	38	107.7	0.4	



Gambar 12. Rata-rata Nilai IMPak

Berdasarkan pengujian iMPak yang telah dilakukan, dapat dilihat nilai dan perbandingan hasil dari tiap spesimen dengan perlakuan PWHT dengan durasi yang berbeda-beda pada tabel 3.4 dan gambar 12. Didapatkan bahwa semakin lama durasi PWHT semakin besar nilai *absorb energy* yang didapat, ditunjukkan pada spesimen dengan PWHT 1 jam mendapatkan nilai iMPak sebesar 1,03 J/mm², spesimen dengan PWHT 2 jam mendapatkan nilai iMPak sebesar 1,15 J/mm², dan spesimen dengan PWHT 3 jam mendapatkan nilai iMPak paling besar yang bernilai 1,21 J/mm². Sementara untuk spesimen tanpa PWHT mendapatkan nilai iMPak sebesar 0,95 J/mm² dan spesimen RAW memiliki nilai iMPak terkecil dengan nilai 0,42 J/mm². Hasil ini memiliki persamaan dengan penelitian yang telah dilaksanakan sebelumnya yaitu pengujian iMPak pada baja S45C yang diberi perlakuan PWHT dengan variasi *holding time* 30 menit, 60 menit, dan 90 menit didapatkan semakin lama *holding time* atau waktu tunggu yang diberikan, semakin tinggi juga nilai ketangguhan iMPaknya. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai ketangguhan iMPak pada *holding time* 30 menit sebesar 0,685 J/mm², *holding time* 60 menit sebesar 0,791 J/mm², dan *holding time* 90 menit sebesar 0,897 J/mm², sedangkan pada material tanpa PWHT mendapatkan nilai ketangguhan hanya 0,355 J/mm²[12]. Perbandingan hasil yang telah didapat dengan penelitian sebelumnya mengenai PWHT pada baja karbon rendah ST42 dengan variasi temperatur yang berbeda juga selaras, dimana pada spesimen tanpa PWHT mendapatkan harga iMPak 0,99 J/mm², spesimen dengan PWHT 600°C sebesar 1,16 J/mm², dan spesimen dengan PWHT 650°C sebesar 1,42 J/mm² [13].

3.3. Hasil Uji Bending

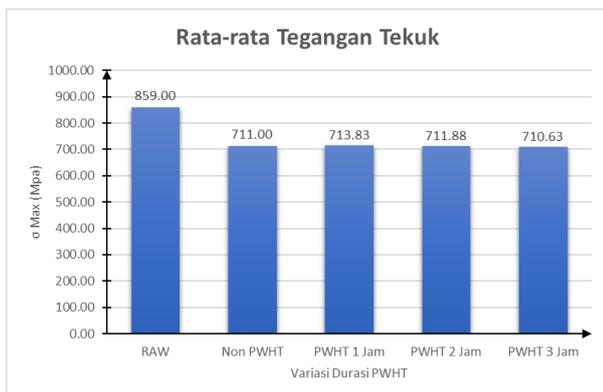
Pengujian bending baja ST 60 ini mengacu pada standar JIH Z2248, dilakukan dengan variasi durasi PWHT yang berbeda dan menggunakan 15 spesimen yang memiliki ukuran yang sama.



Gambar 13. Spesimen setelah dilakukan uji bending

Tabel 3.1 Nilai Tegangan Bending

Spesimen	P max (KN)	σ Max (MPa)	σ	
			Rata-rata (MPa)	Standart Deviasi (MPa)
PWHT 1 Jam	29.27	731.75	713.8	731.75
	28.46	711.50		711.50
	27.93	698.25		698.25
PWHT 2 Jam	25.46	636.50	686.75	636.50
	27.75	693.75		693.75
	29.20	730.00		730.00
PWHT 3 Jam	29.50	737.50	601.17	737.50
	27.35	683.75		683.75
	15.29	382.25		382.25
Non PWHT	28.10	702.50	686.42	702.50
	28.78	719.50		719.50
	25.49	637.25		637.25
RAW	34.65	866.25	859	866.25
	33.73	843.25		843.25
	34.70	867.50		867.50



Gambar 13. Rata-rata Tegangan Tekuk

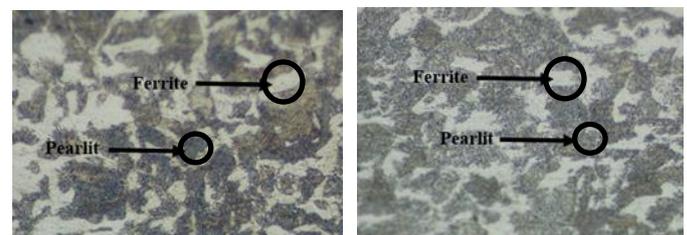
Berdasarkan pengujian bending baja ST60 yang telah dilakukan didapati bahwa nilai rata-rata tegangan tekuk tertinggi terdapat pada spesimen RAW dengan nilai rata-rata 859 MPa, sedangkan pada spesimen dengan PWHT dan tanpa PWHT memiliki nilai rata-rata yang tidak jauh berbeda, dibuktikan dengan nilai rata-rata tegangan tekuk pada spesimen PWHT 1 jam bernilai 713,83 MPa,

spesimen PWHT 2 jam bernilai 711,88 MPa, dan PWHT 3 Jam memiliki nilai paling kecil dengan 710,63 MPa, sedangkan spesimen tanpa PWHT memiliki nilai rata-rata 711 MPa. Hal tersebut didukung oleh peraturan BKI yang menyatakan bahwa nilai kekuatan tekuk pada baja ST 60 adalah ≥ 400 MPa[14] Perbandingan hasil yang telah didapat dengan penelitian sebelumnya mengenai PWHT pada baja karbon rendah ST37 dengan variasi temperatur yang berbeda juga dapat dikatakan selaras namun dengan perubahan yang lebih signifikan, dimana pada spesimen tanpa PWHT mendapatkan nilai tegangan bending 838,46 MPa, spesimen dengan PWHT 550°C sebesar 755,6 MPa, dan spesimen dengan PWHT 600°C sebesar 823,66 MPa, dan spesimen dengan PWHT 650°C sebesar 795,71 MPa [15].

3.4. Hasil Pengujian Struktur Mikro

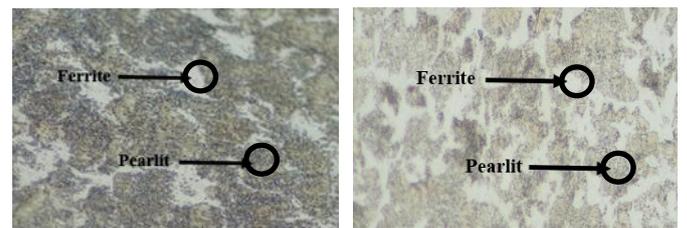
Pengujian mikrofografi ini diaplikasikan pada lima jenis spesimen, yaitu: Baja ST60 yang mengalami perlakuan panas/PWHT dengan durasi holding time selama 1 jam, 2 jam, dan 3 jam, Baja ST60 tanpa perlakuan panas, serta material mentah. Tujuan dari pengujian mikrofografi ini adalah untuk mengidentifikasi dan membandingkan perubahan pada struktur mikro baja ST60 dan untuk mengevaluasi kondisi butiran pada material yang diuji setelah mengalami PWHT. Sebelum melakukan pengujian mikro, spesimen terlebih dahulu diproses melalui polishing dan etching menggunakan larutan HNO₃ dan alkohol. Kemudian, pengujian mikro dilaksanakan dengan pembesaran sebesar 500x, dimana analisis difokuskan pada area pengelasan dan mencakup tiga daerah penting yang akan diteliti lebih lanjut.

1. Hasil struktur mikro pada daerah logam induk base metal



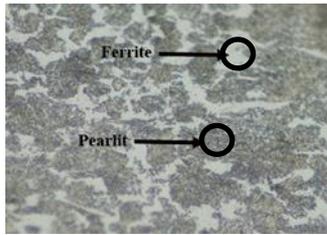
(a) RAW

(b) Non PWHT



(c) PWHT 1 Jam

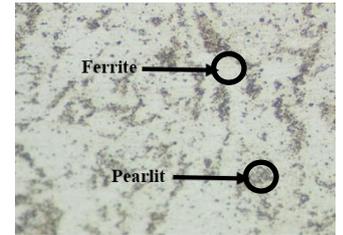
(d) PWHT 2 Jam



(e) PWHT 3 Jam



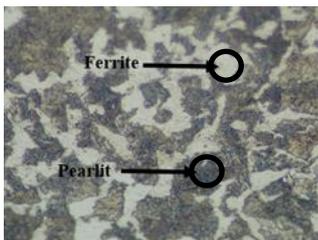
(c) PWHT 1 Jam



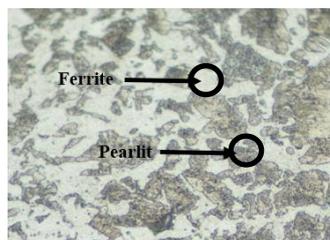
(d) PWHT 2 Jam

Gambar 7. Struktur mikro pada daerah base metal

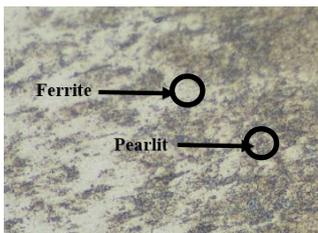
2. Hasil struktur mikro pada daerah HAZ



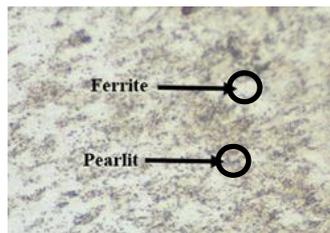
(a) RAW



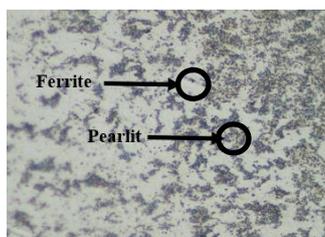
(b) Non PWHT



(c) PWHT 1 Jam



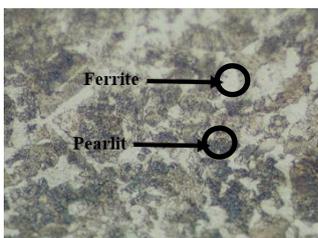
(d) PWHT 2 Jam



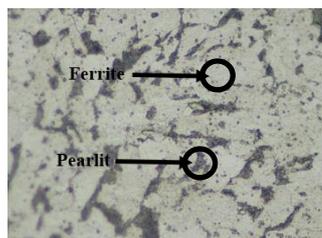
(e) PWHT 3 Jam

Gambar 8. Struktur mikro pada daerah HAZ

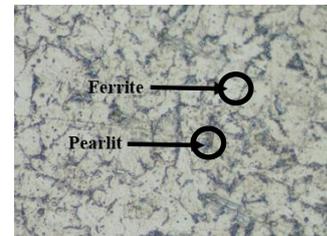
3. Hasil struktur mikro pada daerah weld metal



(a) RAW



(b) Non PWHT



(e) PWHT 3 Jam

Gambar 9. Struktur mikro pada daerah weld metal

Hasil pengamatan yang didapat setelah pengujian mikro didapatkan seperti pada gambar 7, 8 dan 9. Gambar yang didapat menunjukkan terjadi perubahan struktur mikro setelah diberi PWHT pada daerah *base metal*, *HAZ*, dan *weld metal*. Ketiga daerah pada spesimen yang diamati menunjukkan bahwa semakin lama durasi PWHT yang diberikan dapat semakin merapatkan dan merapikan butir *ferrite* dan *pearlit* seperti yang ditunjukkan pada spesimen dengan PWHT 3 jam.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian mengenai pengaruh durasi PWHT terhadap kekuatan uji tarik, uji iMPak, uji bending, dan struktur mikro didapat kesimpulan sebagai berikut : Durasi *Post Weld Heat Treatment Annealing* pada pengelasan GMAW baja ST60 memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanis, pada pengujian tarik nilai tegangan tarik maksimum pada spesimen dengan PWHT 1 jam sebesar 627 MPa lebih baik dibanding tanpa PWHT sebesar 620 MPa, nilai regangan pada spesimen dengan PWHT 3 jam sebesar 6% lebih baik dibanding tanpa PWHT yang hanya bernilai 4,13%, untuk nilai modulus elastisitas spesimen tanpa PWHT memiliki nilai yang lebih baik dibandingkan dengan PWHT dengan nilai modulus sebesar 121,42 GPa. Pengujian iMPak nilai kekuatan terbesar didapat pada spesimen dengan PWHT 3 jam dengan nilai *absorb energy* sebesar 1.21 J/mm² lebih baik dibandingkan dengan spesimen dengan PWHT 1 dan 2 jam serta

tanpa PWHT, sehingga dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa semakin lama durasi PWHT yang diberikan, maka semakin tinggi pula nilai *absorb energy* yang didapat.

Pengujian bending menunjukkan bahwa perlakuan PWHT dapat memperbaiki nilai tegangan tekuk, dimana dengan PWHT 1 jam dengan nilai 713,83 MPa lebih baik dibanding tanpa PWHT sebesar 711 MPa walaupun perubahannya tidak terlalu signifikan. Perlakuan PWHT juga mempengaruhi struktur mikro pada daerah *base metal*, *HAZ* dan *weld metal*, dimana struktur material dengan perlakuan PWHT 3 jam memiliki kerapatan dan kerapian butir yang lebih baik dibandingkan dengan material yang tanpa diberi perlakuan PWHT.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penyelesaian jurnal penelitian ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada INLASTEK Surakarta dan Kepala Lab. Struktur dan Konstruksi Kapal Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro yang telah membantu dalam penelitian tugas akhir penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Suherman and I. Abdullah, *TEKNIK PENGELASAN (CARA MENGHINDARI CACAT LAS)*. 2020.
- [2] W. Suprpto, *Baja dan Aplikasinya*. Malang: Universitas Brawijaya Press, 2023.
- [3] Agus S and J. Pramono, "Teknik Pengelasan Gas Metal MIG/MAG SMK." Penerbit Andi, p. 176, 2021.
- [4] M. Nafi and I. Wahid, "Analisis Kekerasan dan Struktur Mikro Baja ST 60 Hasil Pengelasan SMAW dengan Variasi Arus Las dan Temperatur PWHT," *JIMPS J. Ilm. Mhs. Pendidik. Sej.*, vol. 8, no. 4, doi: 10.24815/jimps.v8i4.26902.
- [5] R. Wurdhani, U. Budiarto, and W. Amiruddin, "Pengaruh Perlakuan Panas (Heat Treatment) Normalizing Terhadap Kekuatan IMPak Aluminium 6061 Pengelasan MIG dengan Variasi Posisi dan Bentuk Kampuh," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 9, no. 1, p. 70, 2021, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- [6] N. Effendi, "Studi pengaruh heat input terhadap ketangguhan iMPact las SMAW posisi vertikal baja ST 60 temper," *Traksi*, vol. 9, no. 2, pp. 10–16, 2009.
- [7] F. Arief and T. H. Ningsih, "PENGARUH VARIASI HOLDING TIME PWHT PADA HASIL PENGELASAN SMAW BAJA AISI 1045 TERHADAP NILAI UJI TARIK," vol. 2, no. 1, pp. 1–7, 2023.
- [8] A. R. Andrea, W. Jatimurti, L. Noerochim, and A. P. Komposisi, "Pengaruh Variasi Holding Temperature dan Terhadap Struktur Mikro dan Distribusi 600 Dengan Metode Smaw Di PT . Holcim Indonesia," vol. 7, no. 1, pp. 58–61, 2018.
- [9] S. T. M. T. Dr. Ir. Saripuddin M., *Mengenal Logam Sebagai Bahan Teknik*. Deepublish, 2021. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=3aU7EAAAQBAJ>
- [10] N. Mulyaningsih and P. P. R. C1nta, *Bahan Teknik : Petunjuk Implementasi*. Magelang: Penerbit Pustaka Rumah C1nta, 2022. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=MjmdEAAAQBAJ>
- [11] F. W. Pribadi and N. S. Drastiawati, "PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DALAM PROSES PWHT PENGELASAN SMAW UNTUK MATERIAL BAJA SS400 TERHADAP NILAI KEKUATAN TARIK DAN KEKUATAN IMPAK," *JTM*, vol. 12, pp. 17–22, 2024.
- [12] T. H. Ningsih, T. M. Prayogo, and A. Fiveriati, "Pengaruh Variasi Waktu Tahan Proses Pengelasan SMAW terhadap Kekuatan IMPak Material S45C," *J-Proteksion J. Kaji. Ilm. dan Teknol. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 64–69, 2023, doi: 10.32528/jp.v8i1.754.
- [13] T. F. Ananda, "PENGARUH PROSES POST WELD HEAT TREATMENT PADA HASIL PENGELASAN SMAW TERHADAP KETANGGUHAN BAJA KARBON RENDAH," *Univ. Negeri Padang*, pp. 1–7, 2019.
- [14] BKI, "Rules for welding," vol. VI, 2024.
- [15] D. Irawan and H. Irawansyah, "PENGARUH PWHT (POST WELD HEAT TREATMENT) PADA PENGELASAN SMAW TERHADAP

KEKERASAN DAN KEKUATAN
TEKAN BAJA ST 37,” *J. Rotary*, vol. 6,
no. 1, pp. 27–40, 2024, doi:
10.20527/jtamrotary.v7i.