



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Pengaruh Variasi Jenis Elektroda dan Variasi Temperatur PWHT pada Pengelasan SMAW terhadap Kekuatan Impak dan Tekuk Baja ST 60

Jan Shaka Ariandra Noor¹⁾, Untung Budiarto¹⁾, Parlindungan Manik¹⁾

¹⁾Laboratorium Las dan Material Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

^{*}e-mail : janshakaariandranoo@students.undip.ac.id

Abstrak

Baja ST 60 merupakan baja karbon menengah yang banyak digunakan dalam industri konstruksi dan perkapalan karena memiliki kekuatan tinggi serta kemampuan menerima perlakuan panas. Namun, proses pengelasan dengan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW) sering menimbulkan tegangan sisa yang dapat menurunkan kualitas sambungan las. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan perlakuan Post Weld Heat Treatment (PWHT) guna mengurangi tegangan sisa, memperhalus struktur mikro, dan meningkatkan sifat mekanik hasil lasan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jenis elektroda (E7016 dan E7018) serta temperatur PWHT (500°C dan 600°C) terhadap kekuatan lentur dan ketangguhan sambungan las baja ST 60. Proses pengelasan dilakukan pada posisi 1G, kemudian spesimen diberi PWHT selama 60 menit. Pengujian dilakukan menggunakan uji tekuk untuk menilai kekuatan lentur dan uji impact untuk mengukur ketangguhan sambungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PWHT berpengaruh signifikan terhadap peningkatan sifat mekanik. Pada uji tekuk, kekuatan tertinggi dicapai oleh elektroda E7016 dengan PWHT 600°C sebesar 940,808 MPa, sedangkan nilai terendah ditunjukkan oleh elektroda E7018 tanpa PWHT sebesar 572,607 MPa. Pada uji impact, ketangguhan tertinggi diperoleh pada elektroda E7018 dengan PWHT 600°C sebesar 1,72 J/mm², dan nilai terendah terdapat pada elektroda E7016 tanpa PWHT sebesar 1,20 J/mm². Dengan demikian, PWHT terbukti meningkatkan kekuatan lentur dan ketangguhan sambungan, sedangkan pemilihan elektroda harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, baik untuk ketahanan lentur maupun ketangguhan terhadap beban dinamis.

Kata Kunci : SMAW , Elektroda E7016 , Elektroda E7018 , PWHT

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang industri perkapalan menuntut adanya inovasi dalam penggunaan material baja, khususnya baja ST 60. Baja ini sering digunakan untuk pembuatan kapal, komponen mesin, dan konstruksi karena sifat mekanik serta kemampuannya dalam perlakuan panas. Baja ST 60 sangat baik digunakan untuk postheat (*heat treatment*), terutama pada suhu yang lebih tinggi, karena meningkatkan ketangguhan. Dengan kandungan karbon sekitar 0,5012%, baja ST 60 termasuk baja karbon sedang yang cocok untuk heat treatment [1]. Menurut *American Welding Society (AWS)*, pengelasan merupakan proses penyambungan logam atau paduan logam secara metalurgi yang terjadi dalam kondisi leleh atau cair. Proses ini pada dasarnya memanfaatkan

energi panas untuk menyatukan dua logam menjadi satu kesatuan [2]. Metode *Electric Arc Welding (EAW)* diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan elektrodanya, yaitu *consumable electrode* yang ikut meleleh dan berfungsi sebagai logam pengisi seperti pada proses SMAW, GMAW/MIG, SAW, dan FCAW, serta *non-consumable electrode* yang tidak meleleh, seperti pada proses GTAW/TIG. Di antara berbagai metode tersebut, SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) merupakan salah satu teknik yang paling banyak digunakan. Proses ini menggunakan elektroda berlapis fluks dan busur listrik untuk mencairkan elektroda serta sebagian logam dasar sehingga terbentuk sambungan yang permanen. Tegangan listrik dalam proses ini juga memengaruhi kecepatan pelelehan dan kualitas hasil pengelasan. Dalam konstruksi las, logam las

harus memiliki kekuatan dan keuletan setidaknya sama dengan logam induk. Namun, proses pengelasan dapat mengubah sifat mekanik logam, tergantung pada kondisi, cara, dan prosedur pengelasan. Pemilihan elektroda yang tepat sangat penting karena elektroda sensitif terhadap kelembaban, debu, dan minyak, sehingga harus disimpan di tempat kering dan bersih untuk menghindari cacat pada hasil las. Selain itu, penyetelan arus pengelasan yang tepat juga krusial. Arus yang terlalu rendah dapat menyebabkan busur listrik sulit menyala dan panas tidak cukup untuk melelehkan elektroda dan logam dasar, menghasilkan rigi-rigi las yang tidak rata dan penetrasi yang kurang dalam [2].

Baja karbon rendah seperti ST 37, ST 40, dan *ASTM A106 Grade B* menjadi pilihan umum karena sifatnya yang mudah dilas, kuat, dan relatif ekonomis. Proses penyambungan baja tersebut umumnya dilakukan dengan metode *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*, yaitu proses pengelasan dengan memanfaatkan panas dari busur listrik antara ujung elektroda terumpan dan logam dasar yang akan disambung [3].

Menurut penelitian Bawazir et al, variasi elektroda E6013, E7016, dan E7018 pada pengelasan baja ST 37 dengan ST 40 menghasilkan perbedaan signifikan terhadap sifat mekanik. Elektroda E7016 menghasilkan nilai kekerasan tertinggi yaitu 77,40 HRC, sedangkan elektroda E7018 memberikan nilai ketangguhan tertinggi dengan energi impak 252 Joule atau 3,15 Joule/mm². Hal ini menunjukkan adanya korelasi antara kekerasan dan ketangguhan, di mana semakin tinggi nilai kekerasan, maka kemampuan material dalam menahan beban kejut cenderung menurun [3].

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa variasi jenis elektroda dalam proses pengelasan *SMAW* berperan penting dalam menentukan kualitas sambungan las. Kajian terhadap pengaruh jenis elektroda terhadap sifat mekanik dan struktur mikro menjadi penting untuk mengetahui elektroda yang paling sesuai digunakan, agar hasil las memiliki kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan yang optimal.

Penggunaan elektroda yang berbeda, termasuk variasi arus dan standar uji tarik, memengaruhi kekuatan sambungan las *SMAW*, di mana elektroda E7016 dan E7018—meski sama-sama berjenis low-hydrogen sesuai standar AWS A5.1—memiliki perbedaan pada lapisan flux, polaritas arus, stabilitas busur, serta efisiensi deposit yang berpengaruh terhadap sifat mekanik, kualitas, dan ketahanan las baja struktural [4].

Proses pengelasan, timbul tegangan sisa (*residual stress*) yang dapat memengaruhi kualitas

hasil pengelasan. Untuk mengurangnya, dilakukan perlakuan panas *PWHT (Post Weld Heat Treatment)*. Penelitian ini mengkaji pengaruh *PWHT* terhadap sifat mekanis pengelasan baja S275J2 menggunakan teknik *SMAW*. Setelah pengelasan, dilakukan *PWHT* pada temperatur 600°C selama 1 jam, kemudian diuji struktur mikro dan impak Charpy (ketangguhan). Hasil uji struktur mikro menunjukkan struktur ferit dan perlit dengan ukuran butir halus, namun struktur butir pada pengelasan dengan *PWHT* lebih seragam dan merata. Uji impak *Charpy* menunjukkan peningkatan tenaga patah setelah *PWHT*, yaitu sebesar 8,98% di base metal, 26,13% di HAZ, dan 52,78% di weld metal. Hasil ini sesuai dengan tujuan *PWHT*, yaitu meningkatkan ketangguhan material [5].

Perkembangan teknologi manufaktur dan industri konstruksi modern menuntut adanya material dengan kekuatan tinggi, ketangguhan, serta kemampuan las yang baik. Baja karbon rendah seperti SS400 dan *ASTM A36* menjadi material yang banyak digunakan pada berbagai aplikasi teknik, termasuk industri perkapalan, konstruksi, dan permesinan, karena sifatnya yang mudah dibentuk, dilas, serta memiliki kombinasi kekuatan dan keuletan yang memadai. Proses penyambungan logam pada baja karbon rendah umumnya dilakukan dengan metode pengelasan, antara lain *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)* dan *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, yang mampu menghasilkan sambungan permanen dengan efisiensi tinggi.

Namun demikian, proses pengelasan dapat menimbulkan berbagai permasalahan pada hasil sambungan, seperti munculnya tegangan sisa, perubahan struktur mikro, serta penurunan sifat mekanik akibat siklus pemanasan dan pendinginan yang tidak seragam. Tegangan sisa yang tinggi dapat menyebabkan distorsi, retak, serta menurunkan ketahanan sambungan terhadap beban dinamis maupun korosi. Untuk mengatasi hal tersebut, dilakukan perlakuan panas pasca-pengelasan (*Post Weld Heat Treatment* atau *PWHT*) yang bertujuan memperbaiki sifat mekanik dan mikrostruktur hasil las. *PWHT* dilakukan dengan cara memanaskan kembali hasil pengelasan pada suhu tertentu di bawah titik leleh material, menahannya untuk waktu tertentu, kemudian mendinginkannya secara terkontrol.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa *PWHT* memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik mekanik dan mikrostruktur baja karbon rendah. Hazazi dan Lubis melaporkan bahwa *PWHT* pada suhu 500°C mampu meningkatkan kekerasan dan memperbaiki struktur mikro baja SS400 hasil las *SMAW* [6]. Sementara

itu, Oladele et al. menyatakan bahwa pada baja karbon rendah hasil pengelasan *MMAW*, proses *PWHT* menyebabkan perubahan ukuran butir dari halus menjadi agak kasar, sehingga menurunkan kekuatan tarik namun memperbaiki homogenitas mikrostruktur [7]. Penelitian Aprianto dan Pranoto menemukan bahwa peningkatan suhu *PWHT* pada proses *GMAW* dapat meningkatkan ketangguhan dan keuletan material, meskipun menurunkan kekuatan tarik akibat berkurangnya densitas dislokasi [8]. Sedangkan Wahab et al. menjelaskan bahwa pada sambungan logam tak sejenis (A36–316L), *PWHT* pada suhu 400°C memberikan hasil optimal terhadap nilai kekerasan dan energi impak [9].

Berdasarkan uraian tersebut, dapat disimpulkan bahwa *PWHT* memiliki peran penting dalam meningkatkan kualitas sambungan las, terutama dalam menyeimbangkan antara kekerasan, kekuatan, dan ketangguhan material. Oleh karena itu, kajian terhadap variasi suhu dan waktu *PWHT* menjadi penting untuk menentukan kondisi optimal yang dapat menghasilkan sambungan las dengan performa mekanik dan mikrostruktur terbaik.

Perlakuan panas adalah suatu proses yang bertujuan untuk mengubah struktur mikro dan sifat mekanik logam dengan cara memanaskannya pada rentang suhu tertentu, kemudian mengatur laju pendinginannya secara terkendali tanpa mengubah komposisi kimianya. Tahapan pemanasan awal dilakukan dengan menaikkan suhu logam dasar sebelum proses pengelasan, yang berfungsi untuk menyesuaikan struktur mikro serta meningkatkan suhu awal material agar sesuai dengan kebutuhan pengelasan. Pemanasan ini juga berpengaruh terhadap laju pendinginan yang menjadi lebih lambat pada daerah logam las dan *HAZ* (*Heat Affected Zone*).

Proses post heating memiliki peran penting dalam menurunkan risiko terjadinya retak dingin maupun retak akibat hidrogen yang muncul karena adanya tegangan sisa tinggi pada hasil pengelasan. Selain itu, perlakuan ini juga mampu meningkatkan keuletan pada daerah *HAZ* (*Heat Affected Zone*) serta memperbaiki kemampuan las pada logam dasar maupun di sekitar *HAZ*. Baja ST60 dikategorikan sebagai baja karbon menengah dengan kadar karbon berkisar antara 0,3% hingga 0,6%, dan memiliki kekuatan tarik minimum sekitar 60 kg/mm², sebagaimana tercermin dari penamaannya. Jenis baja ini umumnya memiliki tingkat kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan besi cor. Berdasarkan hasil penelitian terdahulu, perlakuan postheat pada suhu 550°C dan 600°C memberikan pengaruh signifikan terhadap kekerasan serta struktur mikro baja AISI 1045 yang

dilas menggunakan metode *GMAW*. Pada suhu 550°C, kekerasan daerah *HAZ* mencapai 184,9 HV dengan kecepatan pengelasan 2,5 mm/s, yang merupakan nilai terendah dalam penelitian tersebut. Sementara itu, ketika suhu postheat dinaikkan hingga 600°C, nilai kekerasan meningkat menjadi 263,6 HV pada *HAZ* dengan kecepatan pengelasan 3 mm/s. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu postheat mampu memperbaiki struktur mikro sekaligus meningkatkan sifat mekanik dari sambungan las.

Proses pengelasan *SMAW* merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan, dengan elektroda E7016 dan E7018 sebagai pilihan utama. Namun, sifat mekanik hasil las dapat dipengaruhi oleh pemilihan elektroda dan perlakuan panas pasca las (postheat). Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi jenis elektroda dan variasi temperatur postheat terhadap kekuatan impak dan tekuk baja ST 60.

2. METODE

2.1. Objek Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah Baja ST60. Baja karbon menengah (ST60) merupakan salah satu jenis baja yang masuk dalam kelompok baja karbon sedang. Kandungan karbon ini memungkinkan untuk menjalani proses perlakuan panas (*heat treatment*), yang bertujuan menghasilkan baja yang telah mengeras [10].

Baja karbon merupakan salah satu jenis baja paduan yang tersusun dari dua komponen utama, yaitu besi (Fe) sebagai unsur dasar dan karbon (C) sebagai unsur paduan utamanya. Dalam proses pembuatannya, selain besi dan karbon, seringkali ditambahkan berbagai unsur kimia lainnya seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn), serta elemen-elemen tambahan lain sesuai dengan karakteristik dan sifat baja yang ingin dihasilkan. Kandungan karbon dalam baja karbon bervariasi, umumnya berada dalam rentang 0,2% hingga 2,14%. Peran karbon dalam baja sangat penting, yaitu sebagai unsur pengeras yang memperkuat struktur baja dengan mencegah pergeseran dislokasi dalam kisi kristal atom besi [11].

Tabel 2. 1 Komposisi Baja ST60 [10].

Unsur	Kandungan
Karbon	0.5085%
Silikon	0.2726%
Mangan	0.6703%
Fosfor	0.0114%

2.2 Pengelasan SMAW

Menurut *American Welding Society (AWS)*, pengelasan merupakan proses penyambungan antara logam atau paduan logam melalui ikatan metalurgi yang terjadi saat material berada dalam kondisi cair atau meleleh. Dengan kata lain, pengelasan dapat diartikan sebagai metode penyambungan logam yang menggunakan energi panas sebagai sumber utama untuk menyatukan dan merekatkan material.[12].

Shielded Metal Arc Welding (SMAW), atau yang biasa disebut pengelasan elektroda terlindung, adalah proses pengelasan yang memanfaatkan busur listrik sebagai sumber panas untuk melelehkan logam. Berdasarkan definisi dari *American Welding Society (AWS)*, metode *SMAW* dilakukan dengan menggunakan elektroda berlapis fluks yang menciptakan busur listrik antara elektroda dan logam induk, sehingga menghasilkan sambungan logam yang kuat dan permanen.[12].

Selama pengelasan, lapisan pelapis elektroda terbakar dan menghasilkan gas pelindung yang menjaga elektroda, busur listrik, logam cair, dan area kerja dari pengaruh luar. Fluks yang terbentuk menambah perlindungan, sementara inti kawat elektroda meleleh sebagai bahan pengisi. Pada beberapa elektroda, serbuk besi dalam lapisan pelindung juga menambah suplai logam.

2.3 Kondisi pengelasan 1G

Situasi selama proses pengelasan atau postur pengelasan mengacu pada penempatan dan arah pergerakan elektroda saat menyambungkan logam. Posisi las 1G (Posisi Pengelasan Datar) adalah posisi pengelasan di mana elektroda bergerak secara horizontal pada permukaan datar. Posisi ini sering digunakan dalam konstruksi karena mudah dilakukan dan menghasilkan sambungan yang kuat dan konsisten [13]. Kondisi datar (1G) memungkinkan pengelasan dilakukan dengan lebih mudah karena gravitasi membantu menjaga stabilitas logam cair dan mengurangi risiko cacat las.

2.4 Sistem Kode Identifikasi Elektroda

Elektroda terdiri atas dua komponen utama, yaitu inti logam tanpa lapisan yang berfungsi sebagai penghantar arus dan pegangan pada alat las, serta lapisan luar berupa fluks. Lapisan fluks memiliki peranan penting dalam proses pengelasan, karena berfungsi melindungi logam cair dari pengaruh atmosfer, membentuk gas

pelindung, menstabilkan busur listrik, dan menambahkan unsur paduan ke dalam logam las. Dalam proses pengelasan, elektroda digunakan untuk menghasilkan busur listrik yang mencairkan logam induk dan logam pengisi sehingga terbentuk sambungan las yang menyatu. Setiap jenis elektroda memiliki komposisi kimia yang berbeda, yang berpengaruh terhadap kekuatan tarik, kekuatan luluh, serta kualitas hasil lasan [14].

Kodefikasi elektroda pengelasan dapat dijelaskan sebagai berikut. Elektroda E7018 menunjukkan bahwa huruf E berarti elektroda busur untuk proses SMAW, angka 70 menyatakan kekuatan tarik sebesar 70 ksi, angka 1 menandakan elektroda ini dapat digunakan pada semua posisi pengelasan, sedangkan angka 8 menunjukkan bahwa elektroda tersebut memiliki lapisan fluks dengan kandungan kalium titania tinggi. Sementara itu, elektroda E7016 juga memiliki arti yang sama untuk huruf E, angka 70, dan angka 1, namun angka 6 menandakan bahwa elektroda ini menggunakan lapisan fluks dengan kandungan kalium titania rendah.

2.5 Post Welding Heat Treatment (PWHT)

Postheat merupakan proses perlakuan panas yang dilakukan setelah tahap pengelasan, dan sering disebut sebagai post-weld heat treatment (PWHT). Proses ini bertujuan untuk menstabilkan serta memperbaiki struktur mikro logam, sekaligus meningkatkan sifat mekanis pada hasil sambungan las [15].

Post Weld Heat Treatment (PWHT) atau perlakuan panas pasca-pengelasan dalam jurnal ini merujuk pada proses pemanasan terkontrol yang dilakukan setelah pengelasan *friction stir welding* (FSW) pada sambungan logam dissimilar AA2014-AA5083. Proses ini bertujuan untuk menilai stabilitas termal mikrostruktur dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik sambungan [16]. Postheat umumnya diterapkan pada material yang berisiko mengalami retak akibat pengaruh hidrogen (hydrogen-induced cracking) atau pada material yang memerlukan pengendalian ketat terhadap sifat mekanis setelah proses pengelasan. Oleh sebab itu, postheat menjadi tahap penting dalam rangkaian proses pengelasan guna menjamin integritas serta kinerja sambungan las pada berbagai aplikasi industri.



Gambar 1 Alat PWHT

2.6 Uji Impak

Uji impak bertujuan menilai kemampuan material menyerap energi beban mendadak serta mengungkap sifat kerapuhan dan kelemahan sambungan las. Pada penelitian ini, uji dilakukan dengan metode Charpy pada baja ST60, meliputi area las dan *HAZ*. Spesimen berukuran 10×10×55 mm dengan takikan V (45°, 2 mm) diuji dengan pembebanan berlawanan arah takikan. Hasil uji menunjukkan ketangguhan material dalam satuan J/mm², di mana semakin besar energi yang diserap, semakin tangguh material tersebut [17].

Menurut AWS, uji impak penting untuk memastikan sambungan las memenuhi standar ketangguhan, terutama pada struktur baja dan komponen bertekanan. Spesimen diambil dari area kritis (weld metal, *HAZ*, atau base metal) dengan ukuran standar 10×10×55 mm, dan diuji pada suhu tertentu, misalnya -20°C atau -40°C. AWS D1.1 mensyaratkan energi minimum 27 J pada suhu uji. Selain energi absorpsi, uji ini juga menunjukkan jenis patahan (ductile atau brittle) yang dapat mengidentifikasi retak, kerapuhan hidrogen, atau perubahan mikrostruktur [12].

Dengan demikian Uji Impak menjadi komponen penting dalam proses pengelasan untuk memastikan bahwa sambungan las memiliki ketangguhan yang memadai dan memenuhi standar keamanan serta kinerja, terutama pada aplikasi struktural dan tekanan tinggi.



Gambar 2 Alat Uji Impak

2.7 Uji Tekuk

Uji tekuk adalah pengujian untuk menilai kekuatan material saat diberi beban lentur. Tujuannya adalah mengukur kemampuan material menahan deformasi atau patah saat mengalami tekanan. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan beban perlahan hingga spesimen mencapai titik tertentu, dan hasilnya digunakan untuk mengevaluasi kekuatan tekuk (bend strength) material. Dalam penelitian ini, uji tekuk dilakukan pada baja ST60 dengan variasi kuat arus dan suhu preheat, mengikuti standar *ASTM E19014*.

Evaluasi visual terhadap kualitas suatu material dapat dilakukan melalui pengujian tekuk atau lentur. Uji ini bertujuan untuk menilai kekuatan material setelah menerima beban serta menentukan tingkat elastisitas sambungan las, baik pada zona yang terpengaruh panas (*HAZ*) maupun pada area logam las itu sendiri.

.

.

Dirumuskan :

$$\sigma_b = \frac{3pl}{2bd^2}$$

Di mana σ_b adalah tegangan tekuk yang dinyatakan dalam satuan megapascal (MPa), *P* merupakan beban yang diberikan dalam satuan *Newton* (N), *L* menunjukkan panjang bentang atau jarak antara dua penyangga dalam milimeter (mm), sedangkan *b* dan *d* masing-masing mewakili lebar serta ketebalan spesimen yang juga dinyatakan dalam milimeter (mm) [18].

Penelitian ini menerapkan metode uji tekuk transversal permukaan (face transversal bending).

Metode *face bend* dipilih karena dalam proses ini, permukaan las mengalami tegangan tarik, sedangkan bagian bawah las mengalami tegangan tekan. Fokus pengamatan diarahkan pada area permukaan las yang mengalami tegangan tarik untuk mendeteksi kemungkinan munculnya retakan. Selanjutnya, dilakukan analisis lebih mendalam untuk menentukan lokasi retakan, apakah terjadi pada logam las (*weld metal*), zona terpengaruh panas (*HAZ*), atau di garis fusi (*fusion line*) yang menjadi batas antara logam las dan *HAZ*[16].



Gambar 3 Alat Uji Tekuk

2.8 Standar Deviasi

Deviasi standar merupakan metrik penyebaran yang umum digunakan. Ini mencakup seluruh kelompok data, sehingga memberikan stabilitas yang lebih baik dari pada metrik lainnya. Meskipun demikian, jika terdapat nilai-nilai ekstrem dalam kelompok data tersebut, deviasi standar dapat kehilangan sensitivitasnya, mirip dengan mean. Rumusnya dapat diungkapkan sebagai berikut.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

2.9 Lokasi Penelitian

Dalam penelitian tugas akhir ini, pelaksanaan pengelasan metode SMAW dilakukan disolo. pengujian spesimen untuk uji impak telah dilaksanakan di Laboratorium Las dan Material Kapal. Sedangkan untuk pengujian spesimen Uji Tekuk dilakukan di Laboratorium Mesin, yang terletak di Departemen Teknik Perkapalan dan Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.

2.10. Tahap Penelitian

Penelitian ini mencakup beberapa tahap, diantara lain sebagai berikut:

A. Pengumpulan Bahan

Material yang digunakan berupa baja ST 60 yang termasuk dalam kategori baja karbon menengah (*medium carbon steel*), dengan spesimen berukuran panjang 800 mm, lebar 400 mm, dan tebal 10 mm.

B. Pemotongan Plat

Material baja ST 60 dipotong menjadi dua bagian dari ukuran awalnya, yakni memiliki panjang 800 mm, lebar 400 mm, dan ketebalan 10 mm.

C. Pengelasan Baja ST 60

Material baja ST 60 yang telah dipotong selanjutnya dilas menggunakan metode SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Proses pengelasan ini dilakukan di INLASTEK Welding Institute dengan tahapan sebagai berikut:

- a. Jenis Pengelasan : SMAW
- b. Mesin Las : Krisbow 450W
- c. Jenis Elektroda : Elektroda E-7016 dan E-7018
- d. Logam Induk : Baja ST 60
- e. Voltage : 20 sampai 30 V
- f. Arus (ampere) : 70 sampai 100A

D. Pembuatan Spesimen

Dibuat 24 spesimen uji tekuk dengan dimensi 60x20x10, dan 24 spesimen uji impak dengan dimensi 55x10x10. Proses pembuatan kedua jenis spesimen tersebut.

E. Proses Heat Treatment

Setelah proses pembuatan spesimen selesai, dilakukan perlakuan panas (*heat treatment*) yang terdiri dari dua variasi suhu, yaitu 500°C dan 600°C. Proses *postheating* dilakukan dengan cara menempatkan spesimen uji ke dalam mesin furnace selama 60 menit.

F. Tahap Pengujian

Pengujian tekuk dan impak dilakukan di Laboratorium Teknik Perkapalan serta Laboratorium Teknik Mesin Universitas Diponegoro (UNDIP) yang berlokasi di Semarang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Heat Input

Heat input adalah jumlah energi panas yang masuk ke dalam logam selama proses pengelasan, yang dihasilkan oleh kombinasi arus, tegangan, serta kecepatan

pengelasan. Besarnya heat input biasanya dihitung dalam satuan kJ/mm dengan persamaan:

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

Dalam konteks pengelasan baja ST 60 menggunakan elektroda E7016 dan E7018, heat input memiliki peran penting karena secara langsung memengaruhi lebar *Heat Affected Zone (HAZ)*, perubahan struktur mikro, serta sifat mekanik hasil pengelasan. Heat input yang terlalu tinggi dapat menyebabkan butiran logam tumbuh lebih besar sehingga menurunkan ketangguhan dan meningkatkan risiko retak panas. Sebaliknya, heat input yang terlalu rendah dapat menyebabkan penetrasi las yang kurang sempurna sehingga mengurangi kekuatan sambungan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan perlakuan panas pasca las (*PWHT*) pada variasi suhu 500–600°C mampu memperbaiki sifat mekanik, baik pada uji tekuk maupun impak. Hal ini terkait dengan pengaruh heat input yang dikombinasikan dengan perlakuan panas, sehingga distribusi panas lebih terkendali dan struktur mikro yang terbentuk lebih homogen. Oleh karena itu, kontrol heat input menjadi salah satu faktor penting dalam menjaga kualitas hasil pengelasan baja ST 60.

$$HI = \frac{30 \times 100 \times 60}{150 \times 1000} = 1,2 \text{ Kj/cm}$$

3.2. Hasil Uji Tekuk

Pengujian tekuk pada baja ST 60 ini dilakukan berdasarkan standar ASTM E190-14 dengan menggunakan dua jenis elektroda dan dua variasi suhu *PWHT*. Sebanyak 24 spesimen dipersiapkan dengan dimensi uji yang seragam, di mana setiap variasi diuji melalui empat kali pengulangan. Tujuan pengujian ini adalah untuk menilai kemampuan material dalam menahan beban lentur. Berikut proses pengerjaan dan hasil sebelum dan sesudah pengerjaan.

Penelitian ini menggunakan metode uji tekuk transversal permukaan (*face bend*) untuk mengevaluasi hasil las. Metode ini dipilih karena

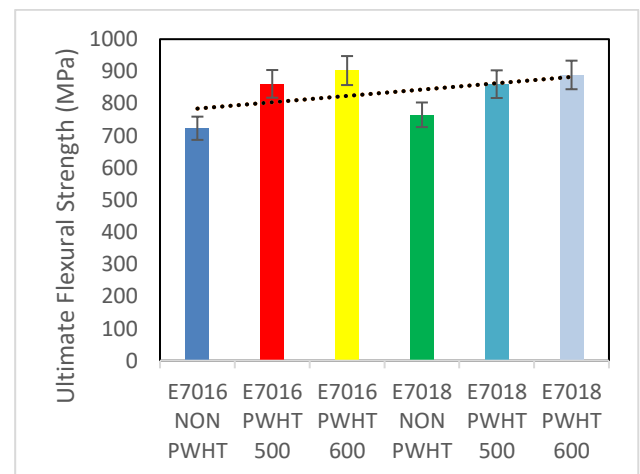
menempatkan permukaan las pada kondisi tarik dan bagian dasar pada kondisi tekan. Pengamatan difokuskan pada permukaan tarik untuk mengidentifikasi retakan serta menentukan lokasinya, apakah di logam las, HAZ, atau garis fusi [16].



Gambar 4 Spesimen Sebelum Pengujian Tekuk



Gambar 5 Spesimen Setelah Pengujian Tekuk



Tabel 3. 1 Ultimate Flexural Strength (Mpa)

Variasi	L (mm)	B (mm)	D (mm)	P (Kn)	Kuat Lentur	Rata Rata Kuat Lentur r (Mpa)
E7016 NON PWH T	60	20	10	143 54,483	724,161 723,731 720,971	722,9
E7016 500°	60	20	10	179,33	849,738 867,889 865,572	861,0
E7016 600°	60	20	10	21925, 18	898,757 906,55 901,858	902,3
E7018 NON PWH T	60	20	10	18490, 43	768,734 767,755 758,211	764,9
E7018 500°	60	20	10	20236, 022	867,832 854,609 857,885	860,1
E7018 600°	60	20	10	156 94,56	879,067 898,569 891,901	889,8

Berdasarkan Gambar 4.7, nilai *Yield Flexural Strength* menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan penerapan *PWHT* dan peningkatan suhu perlakuan panas. Spesimen dengan elektroda E7016 pada kondisi *PWHT* 600°C memiliki nilai tegangan luluh lentur tertinggi, yaitu sebesar 850,588 MPa, yang mengindikasikan bahwa perlakuan panas pada suhu tinggi mampu meningkatkan kemampuan sambungan las dalam menahan beban lentur sebelum mengalami deformasi plastis. Sebaliknya, spesimen E7016 tanpa *PWHT* menunjukkan nilai yield flexural strength terendah, yaitu sebesar 689,838 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa sambungan las tanpa *PWHT* masih dipengaruhi oleh tegangan sisa yang cukup tinggi sehingga menurunkan kemampuan material dalam menahan beban lentur.

Pada spesimen dengan elektroda E7018, tren peningkatan serupa juga terlihat, di mana nilai yield flexural strength meningkat dari 684,584 MPa (non-*PWHT*) menjadi 824,801 MPa pada *PWHT* 600°C. Hasil ini menegaskan bahwa *PWHT* berperan signifikan dalam memperbaiki kualitas mekanik sambungan las melalui relaksasi tegangan sisa dan homogenisasi struktur mikro.

Berdasarkan grafik Ultimate Flexural Strength, terlihat adanya peningkatan kekuatan lentur maksimum akibat perlakuan *PWHT*. Spesimen dengan elektroda E7016 pada *PWHT* 600°C menunjukkan nilai ultimate flexural strength tertinggi, yaitu sebesar 902,390 MPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada spesimen E7016 *Non PWHT*, yaitu sebesar 722,936 MPa.

Peningkatan ini menunjukkan bahwa suhu *PWHT* yang lebih tinggi mampu meningkatkan kemampuan sambungan las dalam menahan beban lentur maksimum sebelum terjadi kegagalan. Pada elektroda E7018, nilai ultimate flexural strength juga meningkat dari 764,900 MPa (*Non PWHT*) menjadi 889,846 MPa pada *PWHT* 600°C, meskipun nilainya sedikit lebih rendah dibandingkan elektroda E7016 pada suhu yang sama. Hasil tersebut juga didukung oleh jurnal S. E. Susilowati and D. Sumardiyanto, bahwa Nilai kekuatan tarik sebesar 617 MPa dan ketangguhan 1,8564 Joule/mm² yang lebih tinggi pada elektroda E 7016 mengindikasikan kemampuan deformasi plastis dan ketahanan terhadap kegagalan lentur yang lebih baik, sehingga elektroda ini dinilai unggul dalam menghadapi kondisi pembebanan tekuk [19].

Secara keseluruhan, hasil uji bending menunjukkan bahwa penerapan *PWHT*, khususnya pada suhu 600°C, memberikan pengaruh paling signifikan terhadap peningkatan kekuatan lentur, keuletan, dan ketahanan energi patah sambungan las baja ST 60. Elektroda E7016 menunjukkan performa terbaik dalam hal kekuatan lentur maksimum, sedangkan elektroda E7018 memberikan karakter deformasi yang lebih stabil. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan jenis elektroda dan temperatur *PWHT* yang tepat sangat penting untuk meningkatkan keandalan sambungan las pada aplikasi struktural yang menerima beban lentur. *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan las baja ringan hasil pengelasan listrik [20]. Elektroda E7016 menghasilkan kekuatan tekuk yang lebih tinggi karena memiliki kandungan hidrogen rendah dan lapisan fluks basa yang mampu menghasilkan struktur mikro logam las yang lebih halus serta menurunkan potensi cacat las, sehingga meningkatkan keuletan dan ketahanan terhadap deformasi lentur [19].

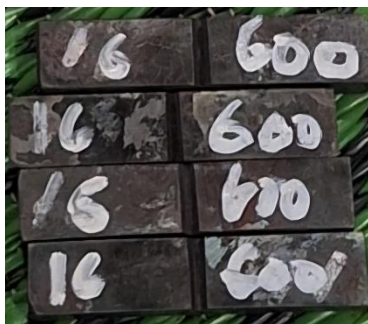
Berdasarkan Rules for Classification and Construction Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) Volume VI tentang pengelasan, elektroda tipe low hydrogen direkomendasikan untuk pengelasan struktur utama kapal yang menggunakan baja karbon menengah dan menerima beban lentur tinggi dengan minimal kekuatan lentur sebesar 400 Mpa [18]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan elektroda E7016 pada pengelasan SMAW baja ST 60 dengan perlakuan *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* pada suhu 600°C menghasilkan kekuatan tekuk tertinggi, yaitu sebesar 902,390 MPa, yang jauh melampaui batas minimum kekuatan lentur yang dipersyaratkan

Gambar 3. 1 Diagram Uji Tekuk

BKI. Oleh karena itu, elektroda E7016 dengan *PWHT* 600°C sangat sesuai diaplikasikan pada struktur utama kapal seperti pelat lambung, geladak, girder utama, serta penegar longitudinal dan transversal yang berfungsi menahan beban lentur global kapal akibat pengaruh gelombang laut.

3.3. Uji Impak

Pengujian impak dilakukan untuk mengetahui ketahanan pada pengelasan *SMAW* baja ST 60 yang diberikan beban secara tiba-tiba. Spesimen diberikan beban pukulan pada palu dengan berat tertentu yang diayunkan dari sudut tertentu.



Gambar 3. 2 Spesimen sebelum pengujian Impak

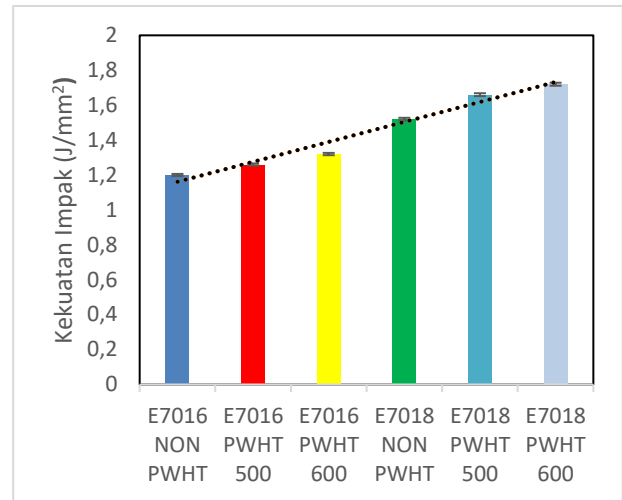


Gambar 3. 3 Spesimen setelah pengujian impak

Tabel 3. 2 Hasil pengujian Impak

Variasi	A (mm ²)	Energi Impak (J)	Kekuatan Impak (J/mm ²)	Rata- rata Kekuatan Impak (J/mm ²)
E7016 NON PWHT	88	97,00	1,10	1,20
	88	116,00	1,32	
	90,4	106,00	1,17	
E7016 500°	88,8	114,00	1,28	1,26
	90,4	117,00	1,29	
	88	106,00	1,20	
E7016 600°	90,4	120,00	1,33	1,32
	92	130,00	1,41	
	91,2	112,00	1,23	
E7018 NON PWHT	85,6	142,00	1,66	1,52
	82,4	119,00	1,44	
	84,8	124,00	1,46	
E7018 500°	88,8	144,00	1,62	1,66
	86,4	151,00	1,75	
	85,6	138,00	1,61	

E7018 600°	88	168,00	1,91	1,72
	88	148,00	1,68	
	96	151,00	1,57	



Gambar 3. 4 Diagram Rata Rata Uji Impak

Berdasarkan hasil pengujian impak pada baja ST 60 dengan variasi elektroda dan perlakuan *Post Weld Heat Treatment (PWHT)*, diperoleh nilai ketangguhan material yang bervariasi antara 1,20 J/mm hingga 1,72 J/mm. Secara umum, hasil menunjukkan bahwa *PWHT* berpengaruh terhadap peningkatan nilai energi impak, terutama pada spesimen yang dilas menggunakan elektroda E7018.

Nilai rata-rata harga impak tertinggi diperoleh pada spesimen E7018 dengan *PWHT* suhu 600°C, yaitu sebesar 1,72 J/mm, sedangkan nilai terendah terdapat pada spesimen *NON PWHT* E7016 dengan nilai 1,20 J/mm. Peningkatan harga impak setelah perlakuan *PWHT* menunjukkan bahwa proses pemanasan mampu mengurangi tegangan sisa dan memperbaiki struktur mikro pada daerah *HAZ (Heat Affected Zone)*, sehingga material menjadi lebih tangguh terhadap beban kejut.

Selain itu, perbandingan antara kedua jenis elektroda menunjukkan bahwa E7018 menghasilkan harga impak yang lebih tinggi dibandingkan E7016 pada seluruh variasi perlakuan. Hal ini disebabkan oleh kandungan unsur deoksidizer dan hydrogen low 48 pada elektroda E7018 yang mampu menghasilkan logam las dengan keuletan dan ketangguhan lebih baik.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa perlakuan *PWHT* dengan suhu 600°C memberikan pengaruh paling signifikan terhadap peningkatan ketangguhan material, baik pada penggunaan elektroda E7016 maupun E7018. Temuan ini mendukung teori bahwa *PWHT* dapat memperhalus struktur butir

dan mengurangi tegangan sisa akibat proses pengelasan, sehingga meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi benturan sebelum patah. Hasil Pengujian juga sudah sesuai dengan penelitian sebelumnya Menurut penelitian F. Bawazir, Bukhari, and A. S. Ismy, variasi elektroda E6013, E7016, dan E7018 pada pengelasan baja ST 37 dengan ST 40 menghasilkan perbedaan signifikan terhadap sifat mekanik. Elektroda E7016 menghasilkan nilai kekerasan tertinggi yaitu 77,40 HRC, sedangkan elektroda E7018 memberikan nilai ketangguhan tertinggi dengan energi impact 252 Joule atau 3,15 Joule/mm² [3]. *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan las baja ringan hasil pengelasan listrik [20]. Berdasarkan pengaruh masukan panas (heat input) terhadap pertumbuhan butir dan sifat mekanik sambungan las, dihipotesiskan bahwa elektroda AWS E7018 menghasilkan ketangguhan impact yang lebih tinggi dibandingkan elektroda E6013 dan E7016. Hal ini disebabkan oleh karakteristik elektroda E7018 yang mampu menghasilkan masukan panas efektif dan stabil pada arus pengelasan tertentu, sehingga memicu proses rekristalisasi dan pembentukan ukuran butir yang relatif lebih seragam dan ulet pada logam las serta daerah HAZ [3]. Dapat disimpulkan bahwa variasi jenis elektroda E7018 memiliki keunggulan dalam menahan beban kejut.

Menurut ketentuan BKI, struktur kapal yang berada pada area dengan beban dinamis, kejut, dan getaran tinggi memerlukan sambungan las dengan tingkat ketangguhan yang baik untuk mencegah kegagalan getas dengan minimal kekuatan impact sebesar 27 J [21]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengelasan baja ST 60 menggunakan elektroda E7018 dengan perlakuan *PWHT* pada suhu 600°C menghasilkan ketangguhan impact tertinggi, yaitu sebesar 1,72 J/mm² atau dikonversi menjadi Joule sebesar 172 J, yang menunjukkan kemampuan sambungan las dalam menyerap energi benturan secara optimal. Dengan demikian, elektroda E7018 dengan *PWHT* 600°C direkomendasikan untuk diaplikasikan pada area kapal yang menerima beban dinamis dan kejut, seperti struktur di sekitar ruang mesin,udukan mesin utama, daerah buritan, serta area dekat sistem propulsi, sehingga memenuhi persyaratan ketangguhan sambungan las sesuai aturan BKI.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi jenis elektroda dan perlakuan *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* memberikan pengaruh yang

signifikan terhadap sifat mekanik sambungan las baja ST 60. Pada pengujian tekuk, kekuatan lentur tertinggi diperoleh dengan penggunaan elektroda E7016 yang diberi *PWHT* pada suhu 600°C, mencapai 902,3 MPa, sedangkan kekuatan terendah ditunjukkan oleh elektroda E7016 tanpa *PWHT* dengan nilai 722,9 MPa. Pada pengujian impact, ketangguhan tertinggi dicapai oleh elektroda E7018 dengan *PWHT* 600°C sebesar 1,72 J/mm², sementara nilai terendah terdapat pada elektroda E7016 tanpa *PWHT* dengan rata-rata 1,20 J/mm². Hasil ini membuktikan bahwa *PWHT* dalam rentang suhu 500–600°C efektif dalam menurunkan tegangan sisa, memperhalus struktur mikro, serta meningkatkan kekuatan lentur dan ketangguhan sambungan, sehingga kualitas pengelasan baja ST 60 dapat ditingkatkan secara signifikan.

Selain itu, hasil penelitian menegaskan bahwa pemilihan jenis elektroda berperan penting dalam menentukan performa mekanik sambungan. Elektroda E7016 lebih unggul dalam meningkatkan kekuatan lentur karena karakteristik fluksnya yang menghasilkan penetrasi dalam dan busur stabil, sehingga cocok untuk aplikasi struktural yang menuntut ketahanan terhadap beban statis atau lentur tinggi. Sebaliknya, elektroda E7018 menunjukkan performa lebih baik dalam meningkatkan ketangguhan terhadap beban dinamis, terutama setelah perlakuan *PWHT* pada suhu 600°C. Hal ini disebabkan oleh kandungan serbuk besi yang lebih tinggi pada lapisan fluks E7018, yang memperbaiki deposisi logam las dan meningkatkan kemampuan logam dalam menyerap energi benturan. Dengan demikian, pemilihan elektroda sebaiknya disesuaikan dengan karakteristik aplikasi, apakah lebih menekankan pada kekuatan lentur (E7016) atau ketangguhan terhadap beban benturan (E7018).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Inlastek Welding Institute Solo, Laboratorium Teknik Perkapalan, serta Laboratorium Teknik Mesin Universitas Diponegoro atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Y. Pratama and Y. Yunus, "Pengaruh Post Weld Heat Treatment (PWHT) Dengan Variasi Media Pendinginan Hasil Pengelasan SMAW Pada Pipa Kilang ASTM A 106 Grade B Terhadap Kekuatan

- Bending Dan Struktur Mikro,” *J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 03, pp. 69–76, 2022.
- [2] A. H. Nasution, “Pengaruh Variasi Elektroda Pengelasan SMAW Pada Baja AISI SS201 Terhadap Hasil Uji Tarik,” *Pros. Semin. Nas. Tek. UISU*, pp. 1–3, 2023.
- [3] F. Bawazir, Bukhari, and A. S. Ismy, “Pengaruh Variasi Elektroda Las Pada Sambungan,” *J. Mesin Sains Terap.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–6, 2021.
- [4] dan S. Wahyudi, R., Nurdin., “Analisa Pengaruh Jenis Elektroda Pada Pengelasan SMAW Penyambungan Baja Karbon Rendah Dengan Baja Karbon Sedang Terhadap Tensile Strength,” *J. Weld. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 43–47, 2019.
- [5] K. A. Nasra, Zuldesmi, and J. C. Kewas, “Pengaruh Post Weld Heat Treatment Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon ST42 dengan Pengelasan SMAW (Shielded Metal Arc Welding),” *ACTUATOR J. Tek. ...*, vol. 1, no. 1, pp. 26–36, 2020, [Online]. Available: <http://ejurnal-mapalus-unima.ac.id/index.php/actuator/article/view/115>
- [6] D. S. W. Hermawan Yudha Prasetya Taufik Wisnu Saputra, “Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha,” *J. Pendidik. Tek. Mesin Undiksha*, vol. 10, no. 2, pp. 14–21, 2022, [Online]. Available: <http://10.0.93.79/jptm.v10i2.51606>
- [7] I. O. Oladele, D. B. Alonge, T. O. Betiku, E. O. Igbafen, and B. O. Adewuyi, “Performance Evaluation of the Effects of Post Weld Heat Treatment on the Microstructure, Mechanical and Corrosion Potentials of Low Carbon Steel,” *Adv. Technol. Mater.*, vol. 44, no. 1, pp. 41–47, 2019, doi: 10.24867/atm-2019-1-007.
- [8] E. Aprianto and H. Pranoto, “Literature Review on Microstructure and Mechanical Properties of Ss400 Steel Due To Variations in PWHT Temperature in the GMAW Welding Process,” *Int. J. Adv. Technol. Mech. Mechatronics Mater.*, vol. 06, no. 2, pp. 107–118, 2025, doi: 10.37869/ijatec.v6i2.129.
- [9] A. Wahab, L. H. Arma, H. Arsyad, and R. Bin Othman, “Effect of Temperature Variation PWHT Dissimilar Welding Low Carbon Steel ASTM A36 with ASTM A240 Type 316L,” *EPI Int. J. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 33–37, 2024, doi: 10.25042/epi-ije.022024.05.
- [10] R. Redi Putra, S. Jokosisworo, and A. S. Wibawa Budi, “JURNAL TEKNIK PERKAPALAN 60 sebagai Bahan Poros Baling-baling Kapal (Propeller Shaft) setelah Proses Tempering,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 6, no. 1, p. 83, 2018, [Online]. Available: <http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/nava1>
- [11] Y. Miranda and A. M. Bade, “Analisa Perbedaan Temperatur Pada Material Baja Karbon Rendah S355Jo Terhadap Distorsi Pada Pengelasan Smaw,” *Zo. Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 10–18, 2018.
- [12] N. W. L. Rd, *Seventh Edition , Volume 5*. American Welding Society, 550, 1997.
- [13] D. R. Nero and Suheni, “Pengaruh Pengelasan SMAW Menggunakan Beda Elektroda dan Posisi Pengelasan 1G , 2G , 3G Berbahan Baja ASME SA36 terhadap Pengujian Kekerasan Vickers dan Struktur Makro,” *Pros. Semin. Nas. Teknol. Ind. Berkelanjutan III*, vol. 3, no. Senastitan Iii, pp. 1–7, 2023, [Online]. Available: <http://ejurnal.itats.ac.id/senastitan/article/view/4192>
- [14] V. Ayu Setyowati, E. Wahyu Restu Widodo, and T. Mesin -Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya Jl Arief Rahman Hakim, “Analisa Pengaruh Jenis Elektroda Pengelasan Smaw Terhadap Kekuatan Stainless Steel 304,” *Pros. Semin. Nas. Sains dan Teknol. Terap.*, vol. 0, no. 0, pp. 179–184, 2016, [Online]. Available: <http://ejurnal.itats.ac.id/sntekpan/article/view/1339>
- [15] N. Ashok G.S *et al.*, “Effect of pre- and post-weld heat treatments on the microstructure and mechanical properties of the rotatory friction welded martensitic steel-soft magnetic alloy joints,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 929, no. February, p. 148121, 2025, doi: 10.1016/j.msea.2025.148121.
- [16] V. Sharma, M. P. Sharma, and A. K. Jain, “Journal of Alloys and Metallurgical Systems Effect of post-weld heat treatment on dissimilar AA2014-AA5083 friction stir welded joints,” *J. Alloy. Metall. Syst.*, vol. 10, no. December 2024, p. 100177, 2025, doi: 10.1016/j.jalmes.2025.100177.
- [17] M. F. Hilaqil S and W. Amiruddin, “JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisis Pengaruh Durasi Post Weld Heat Treatment Annealing Pada Pengelasan GMAW Baja ST60 Terhadap Kekuatan Uji Tarik, Uji IMPak, Uji Bending dan Struktur Mikro,” *J. Tek. Perkapalan*, vol. 12, no. 3, pp. 1–11, 2024, [Online]. Available:

<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>

- [18] B. K. Indonesia, “Rules for Classification and Construction Part 1 Seagoing Ships RULES FOR WELDING,” vol. VI, 2024, [Online]. Available: www.bki.co.id
- [19] S. E. Susilowati and D. Sumardiyanto, “JURNAL KAJIAN TEKNIK MESIN Vol 9 No1 Hal 25-34 PENGARUH JENIS ELEKTRODA E 6010 DAN E 7016 TERHADAP SIFAT MEKANIS DAN STRUKTUR MIKRO PIPA API 5L GRADE X 52,” vol. 9, no. 1, pp. 25–34, 2024.
- [20] R. K. Aninda, S. M. Karobi, R. Shariar, and M. Rahman, “Effect of post-weld heat treatment on mechanical properties and microstructure in electric arc welded mild steel joints,” *J. Eng. Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 210–215, 2024, doi: 10.1016/j.jer.2023.10.012.
- [21] B. K. INDONESIA, “RULES FOR THE CLASSIFICATION AND RULES FOR WELDING 2018 EDITION BIRO KLASIFIKASI INDONESIA,” vol. VI, 2018.