

ANALISA PENGARUH VARIASI WAKTU DAN SUHU POST WELD HEAT TREATMENT TERHADAP NILAI KEKERASAN PADA HASIL PENGELASAN FCAW BAJA KARBON API 5L X65

Sony Liston¹, Basuki Rahmat², Muhammad Faiz Dwisusilo³

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Batam, Jl. Uniba No. 5
Batam Center, Kota Batam, Kepulauan Riau 29432, Indonesia

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi waktu dan suhu *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap nilai kekerasan, hasil pengelasan metode *Flux Cored Arc Welding* (FCAW) pada baja karbon API 5L X65. Pengujian kekerasan metode *Vickers* dilakukan pada tiga area utama yaitu *Base Metal* (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), dan *Weld Metal* (WM). Tiga perlakuan PWHT diterapkan, yaitu mengikuti standar AWS D1.1/D1.1M serta dua variasi waktu dan suhu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses PWHT mengikuti standar AWS menghasilkan nilai rata-rata terendah dengan BM (164–166 HV10), HAZ (183–186 HV10), dan WM (205 HV10). Perlakuan variasi pertama menunjukkan peningkatan kekerasan pada BM (187 HV10), HAZ (199–201 HV10), dan WM (217–219 HV10), sedangkan variasi kedua menghasilkan nilai tertinggi dengan BM (192–193 HV10), HAZ (215 HV10), dan WM (235–237 HV10). Seluruh hasil PWHT standar AWS berada di bawah batas maksimum 240 HV yang direkomendasikan, sementara variasi waktu dan suhu mendekati batas tersebut. Temuan ini menunjukkan bahwa parameter PWHT yang sesuai standar lebih efektif dalam menurunkan nilai kekerasan, mengurangi risiko retak dingin, serta meningkatkan ketangguhan sambungan las.

Kata Kunci: API 5L X65; FCAW; Kekerasan; PWHT; *Vickers*

Abstract

This study aims to analyze the effect of variations in time and temperature of *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) on hardness values, welding results of the *Flux Cored Arc Welding* (FCAW) method on API 5L X65 carbon steel. *Vickers* hardness testing was carried out on three main areas, namely *Base Metal* (BM), *Heat Affected Zone* (HAZ), and *Weld Metal* (WM). Three PWHT treatments were applied, namely following the AWS D1.1/D1.1M standard and two variations of time and temperature. The test results showed that the PWHT process following the AWS standard produced the lowest average value with BM (164–166 HV10), HAZ (183–186 HV10), and WM (205 HV10). The first variation treatment showed an increase in hardness in BM (187 HV10), HAZ (199–201 HV10), and WM (217–219 HV10), while the second variation produced the highest values with BM (192–193 HV10), HAZ (215 HV10), and WM (235–237 HV10). All standard AWS PWHT results were below the recommended maximum limit of 240 HV, while the time and temperature variations approached that limit. These findings indicate that standard PWHT parameters are more effective in reducing hardness values, reducing the risk of cold cracking, and increasing the toughness of welded joints.

Keywords: API 5L X65; FCAW; Hardness; PWHT; *Vickers*

1. Pendahuluan

Peran teknologi pengelasan dalam industri fabrikasi dan konstruksi sangat penting karena kualitas sambungan las menentukan kekuatan, keandalan, dan umur pakai suatu struktur. Proses ini tidak hanya sekedar penyambungan logam, tetapi juga melibatkan variabel teknis yang kompleks, seperti metode, jenis bahan pengisi, serta kontrol kualitas hasil las. Kesalahan pada salah satu faktor tersebut dapat menimbulkan cacat atau bahkan kegagalan struktur. Salah satu aspek kritis dalam pengelasan adalah nilai kekerasan material, terutama pada daerah *weld metal* (WM) dan *heat affected zone* (HAZ). Kekerasan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan retak dingin (*cold cracking*) akibat tegangan sisa, khususnya pada baja karbon berkekuatan tinggi.

Hasil uji kekerasan dengan material API 5L X65 menggunakan jenis pengelasan FCAW menunjukkan bahwa nilai pada daerah HAZ (260–262 HV10) dan WM (268–271 HV10) melampaui batas maksimum yang diizinkan menurut standar NACE MR0175– API 5L, yaitu 240 HV10. Sementara itu, *base metal* masih berada dalam ambang aman (± 211 –212 HV). Lonjakan kekerasan ini mengindikasikan adanya perubahan mikrostruktur akibat proses pendinginan cepat selama pengelasan. Kondisi ini perlu diatasi agar struktur hasil las tetap aman dan memiliki keandalan tinggi.

Salah satu solusi yang banyak diterapkan adalah *Post Weld Heat Treatment* (PWHT), yaitu proses pemanasan ulang pada sambungan las untuk menurunkan kekerasan, mengurangi tegangan sisa, serta memperbaiki sifat mekanis material. Standar AWS D1.1/D1.1M membuktikan PWHT mampu menurunkan kekerasan secara signifikan, namun proses ini membutuhkan biaya dan waktu relatif tinggi. Oleh karena itu, kajian variasi waktu dan suhu PWHT diperlukan untuk mendapatkan alternatif yang lebih efisien tanpa mengurangi efektivitas dalam menurunkan kekerasan hingga batas yang diterima (≤ 240 HV10).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penulis mengambil judul: “Analisa Pengaruh Variasi Waktu dan Suhu *Post Weld Heat Treatment* Terhadap Nilai Kekerasan Pada Hasil

Pengelasan FCAW Baja Karbon API 5L X65.”

2. Metode Penelitian

Metodologi penelitian merupakan cara sistematis untuk mengumpulkan dan menganalisis data guna menjawab pertanyaan penelitian. Penelitian ini menggunakan metode studi kasus, yaitu serangkaian kegiatan ilmiah yang dilakukan secara intensif, terperinci, dan mendalam terhadap suatu program, peristiwa, atau aktivitas nyata untuk memperoleh pengetahuan mendalam (Rahardjo, 2017 dalam Hidayat, 2019).

Tahapan studi kasus meliputi penentuan tema dan subjek penelitian, lokasi, metode yang sesuai, teknik pengumpulan data, analisis hasil, serta penyusunan kesimpulan dan laporan. Hasil penelitian dapat dikatakan ilmiah apabila bersifat objektif, sistematis, dan mengikuti prosedur penelitian yang berlaku.

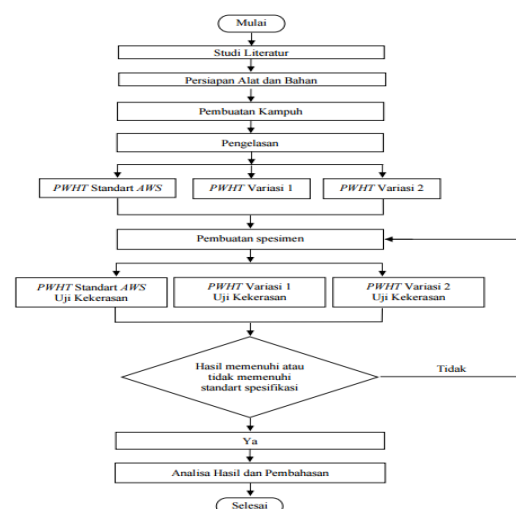
Variabel yang diamati berupa analisis data, yaitu mengolah data yang didapatkan dari hasil pengujian. Kemudian diolah dalam persamaan statistika yaitu mencari rata-rata (*mean*) sebagai berikut:

$$\text{Rata-rata (mean)} = \frac{n}{N}$$

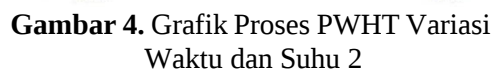
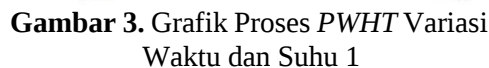
Dimana: n = nilai

N = jumlah data tiap variabel

Data yang diperoleh merupakan data yang bersifat kuantitatif berarti data berupa angka-angka yang selanjutnya disajikan dengan diagram.



Gambar 1. Flowchart Penelitian



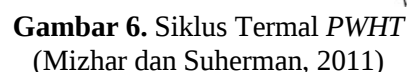
JENIS	AWS <i>D1.1/D1.1M</i>	Variasi Waktu & Suhu 1	Variasi Waktu & Suhu 2
<i>Heating Rate</i>	220 °C/h	300 °C/h	400 °C/h
<i>Holding Time</i>	30 Menit	20 Menit	10 Menit
<i>Holding Temperature</i>	600-650 °C/h	600-650 °C/h	600-650 °C/h
<i>Cooling Rate</i>	200 °C/h	300 °C/h	400 °C/h

Pengelasan FCAW (Flux-Cored Arc Welding) adalah proses pengelasan dengan busur listrik yang menggunakan elektroda berbentuk kawat berisi fluks (flux-cored wire). Fluks ini

Proses FCAW dikembangkan pada tahun 1950-an sebagai pengembangan dari pengelasan GMAW (Gas Metal Arc Welding/MIG-MAG). FCAW menawarkan keunggulan karena dapat digunakan dengan atau tanpa gas pelindung eksternal, membuatnya lebih fleksibel di berbagai kondisi kerja, termasuk lingkungan luar ruangan yang berangin.



Menurut Mizhar dan Suherman (2011), *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* adalah proses *heat treatment* untuk menghilangkan tegangan sisa setelah pengelasan. Pada baja karbon, pemanasan dan pendinginan menyebabkan perubahan struktur butir yang meningkatkan kekerasan namun menurunkan ketangguhan. Melalui proses *PWHT*, struktur tersebut dipulihkan dengan pemanasan pada suhu dan waktu tertentu sesuai jenis serta ketebalan material. *PWHT* dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu pemanasan dalam dapur atau *localized heating* di sekitar daerah las. Dalam penelitian ini, *PWHT* dilakukan menggunakan metode pemanasan dalam dapur.



C. Pengujian Kekerasan (Vickers)

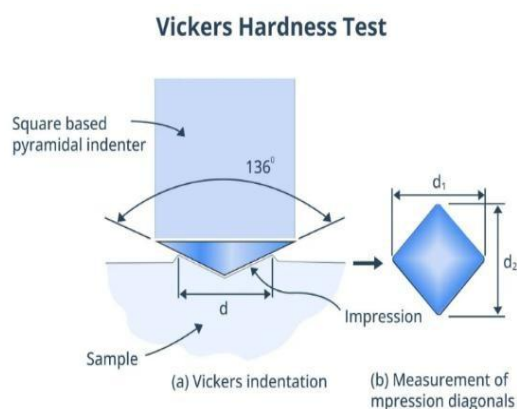
Metode Vickers adalah pengujian kekerasan yang dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan metode Brinell dan Rockwell, terutama pada material tipis, kecil, atau dengan struktur mikro kompleks. Pengujian ini diatur dalam ASTM E92 dan ISO 6507, dengan indenter berbentuk piramida intan bersudut 136° yang ditekan menggunakan beban 0,001–120 kgf selama 10–15 detik. Lekukan berbentuk bujur sangkar kemudian diukur diagonalnya dengan mikroskop, dan nilai kekerasan dihitung menggunakan rumus:

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2}$$

dengan

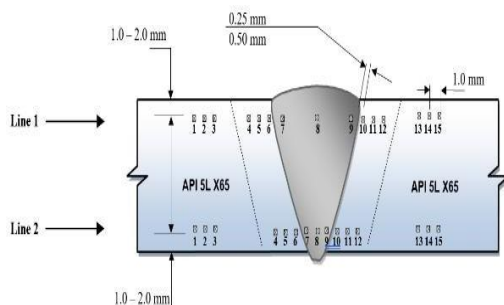
F = beban (kgf)

d = rata-rata panjang diagonal (mm).

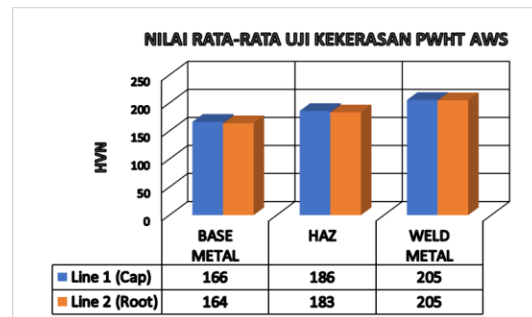


Gambar 7. Skema Pengujian Kekerasan Metode Vickers (ASTM E92-23)

4. Hasil dan Pembahasan



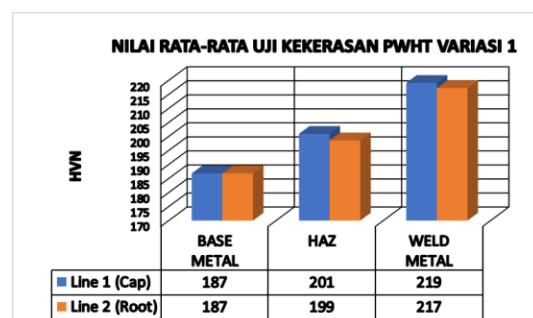
Gambar 8. Posisi Titik Pengujian Kekerasan



Gambar 9. Grafik Nilai Rata-Rata Uji Kekerasan Spesimen PWHT AWS

Hasil uji kekerasan setelah PWHT sesuai dengan standar AWS menunjukkan variasi pada tiga daerah pengelasan. *Base Metal* memiliki nilai terendah, yaitu 166 HV (*Line 1/Cap*) dan 164 HV (*Line 2/Root*), karena hanya sedikit terpengaruh panas. *HAZ* mencapai 186 HV (*Line 1/Cap*) dan 183 HV (*Line 2/Root*), atau naik sekitar 12% dibanding *base metal*, mencerminkan zona transisi akibat paparan panas sedang. *Weld Metal* menunjukkan kekerasan tertinggi, yaitu 205 HV, naik 23–25% dari *base metal*, karena merupakan inti pencairan dan pembekuan logam.

Secara keseluruhan, distribusi kekerasan setelah PWHT menunjukkan pola stabil dengan urutan *Base Metal* < *HAZ* < *Weld Metal*. Nilai kekerasan masih dalam batas standar, sehingga PWHT terbukti efektif menurunkan serta menyeimbangkan kekerasan, sekaligus meningkatkan keamanan dan kualitas mekanis sambungan las.



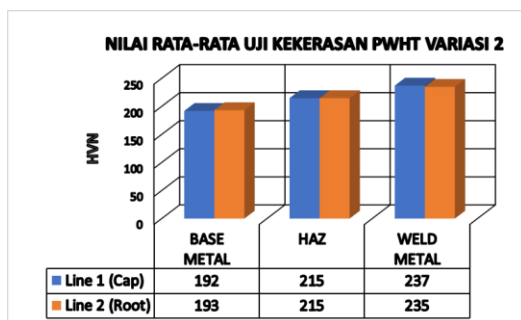
Gambar 10. Grafik Nilai Rata-Rata Uji Kekerasan Spesimen PWHT Variasi 1

Setelah dilakukan proses PWHT variasi 1, rata-rata kekerasan pada *Base Metal* tercatat 187 HV untuk bagian *Cap* dan bagian *Root*, menunjukkan bahwa sifat dasar logam tetap stabil setelah perlakuan panas. Pada *HAZ*, nilai kekerasan sedikit lebih tinggi, yakni 201 HV

pada (*Line 1/Cap*) dan 199 HV pada (*Line 2/Root*), atau sekitar 7,5% lebih tinggi dibanding *base metal*. Hal ini menandakan bahwa zona transisi masih dipengaruhi panas, meskipun dalam tingkat yang moderat dan masih dalam batas aman.

Sementara itu, *Weld Metal* menunjukkan nilai tertinggi, yaitu 219 HV (*Line 1/Cap*) dan 217 HV (*Line 2/Root*), atau sekitar 17% di atas *base metal*. Nilai ini masih berada di bawah batas maksimum standar, sehingga tidak menimbulkan risiko berlebih terhadap ketangguhan sambungan.

Secara keseluruhan, pola distribusi kekerasan tetap konsisten dengan urutan $BM < HAZ < WM$. Selisih nilai antar zona tidak terlalu ekstrem, menandakan bahwa *PWHT* variasi 1 cukup efektif menurunkan dan menyeimbangkan kekerasan. Dengan demikian, hasil ini membuktikan bahwa perlakuan panas mampu mengurangi ketimpangan sifat mekanik antar zona las, sehingga sambungan menjadi lebih aman, stabil, dan andal untuk digunakan.

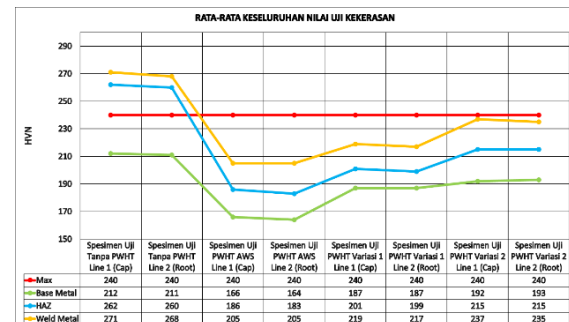


Gambar 11. Grafik Nilai Rata-Rata Uji Kekerasan Spesimen *PWHT* Variasi 2

Pembahasan

Proses *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* merupakan salah satu metode penting dalam pengelasan untuk mengurangi tegangan sisa, meningkatkan keuletan, dan mengendalikan kekerasan terutama pada daerah *Heat Affected Zone (HAZ)* dan *Weld Metal (WM)*. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis perbandingan rata-rata nilai kekerasan pada material API 5L X65 dengan tebal 12,7 mm dengan proses pengelasan *FCAW* yang diberi proses *PWHT* dengan tiga variasi perlakuan: yaitu dengan standar AWS, variasi suhu dan waktu 1, serta variasi suhu dan waktu 2.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menurunkan nilai kekerasan yang menyebabkan meningkatnya resiko retak pada hasil pengelasan dan menilai efektivitas setiap perlakuan *PWHT* dalam menurunkan kekerasan pada area *BM*, *HAZ*, dan *WM* agar tetap berada di bawah batas maksimum kekerasan yang diterima, yaitu 240 HV10.



Gambar 12. Grafik Keseluruhan Rata-Rata Nilai Uji Kekerasan

Hasil uji kekerasan menunjukkan bahwa spesimen tanpa *PWHT* memiliki nilai tertinggi, yakni *WM* 271–268 HV10 dan *HAZ* 262–260 HV10, melebihi batas maksimum 240 HV10. Kondisi ini berpotensi menimbulkan kerapuhan dan retak akibat tegangan sisa serta pembentukan struktur martensitik dari pendinginan cepat. Hal ini menegaskan pentingnya *PWHT* untuk menurunkan kekerasan ke tingkat aman.

Pada *PWHT* standar AWS (*heating rate* 220°C/h, *holding temperature* 600–650°C, *holding time* 30 menit, *cooling rate* 200°C/h), kekerasan turun signifikan: *WM* 205 HV10, *HAZ* 186–183 HV10, dan *BM* 166–164 HV10, seluruhnya jauh di bawah ambang batas. Perlakuan ini terbukti paling efektif dalam menstabilkan struktur mikro dan menghilangkan tegangan sisa.

Variasi 1 (*heating rate & cooling rate* 300°C/h, *holding time* 20 menit) menghasilkan kekerasan lebih tinggi dibanding standar AWS, yakni *WM* 219–217 HV10 dan *HAZ* 201–199 HV10. Penurunan ini masih aman, tetapi kurang optimal karena waktu tahan lebih singkat sehingga rekristalisasi belum menyeluruh.

Variasi 2 (*heating rate & cooling rate* 400°C/h, *holding time* 10 menit) menurunkan kekerasan paling sedikit, dengan *WM* 237–235 HV10, *HAZ* 215 HV10, dan *BM* 192–193 HV10.

Nilai ini mendekati batas maksimum, menandakan bahwa peningkatan *heating rate* dan pengurangan waktu tahan membuat pelunakan mikrostruktur kurang efektif, meski lebih efisien dari sisi waktu dan energi.

Secara umum, seluruh *PWHT* berhasil menurunkan kekerasan ke bawah 240 HV10. Namun, efektivitas sangat dipengaruhi oleh parameter proses. *PWHT* standar AWS memberikan hasil terbaik, diikuti variasi 1, lalu variasi 2. Dengan demikian, pemilihan parameter *PWHT* harus mempertimbangkan tujuan pengelasan, efisiensi proses, dan kriteria kualitas yang diharapkan.

5. Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Analisa Pengaruh Variasi Waktu dan Suhu *Post Weld Heat Treatment* Terhadap Nilai Kekerasan Pada Hasil Pengelasan *FCAW* Baja Karbon API 5L X65, dapat disimpulkan hal-hal berikut:

- 1) Variasi suhu dan waktu *PWHT* memang mampu menurunkan nilai kekerasan pada daerah *Base Metal (BM)*, *Heat Affected Zone (HAZ)*, dan *Weld Metal (WM)* dibandingkan dengan spesimen tanpa *PWHT*. Namun, tingkat efektivitasnya berbeda. *PWHT* dengan parameter standar AWS *D1.1/D1.1M* menghasilkan penurunan kekerasan yang paling signifikan dan konsisten hingga berada di bawah batas maksimum 240 HV, sedangkan *PWHT* dengan variasi waktu dan suhu pertama serta kedua menunjukkan penurunan, tetapi nilai kekerasan masih relatif lebih tinggi dibandingkan dengan *PWHT* sesuai standar AWS *D1.1/D1.1M*, khususnya pada daerah *HAZ* dan *WM*.
- 2) Proses *PWHT* dengan parameter standar AWS *D1.1/D1.1M* memberikan hasil paling optimal dibandingkan proses *PWHT* dengan variasi suhu dan waktu lain, dengan penurunan kekerasan yang signifikan nilai rata-rata kekerasan pada bagian *Base Metal* sebesar 166 HV pada bagian *cap* dan 164 HV pada bagian *root*, kemudian pada bagian *HAZ* sebesar 186 HV pada bagian *cap* dan 183 HV pada bagian *root*, pada daerah *Weld Metal*

sebesar 205 HV pada bagian *cap* dan juga *root* yang berada jauh di bawah ambang batas, sehingga meningkatkan kualitas sambungan las serta kestabilan struktur mikro.

Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya dan peningkatan kualitas hasil pengelasan serta evaluasi lebih menyeluruh terhadap perlakuan *PWHT* pada baja karbon API 5L X65 dengan menggunakan pengelasan *FCAW*, beberapa saran berikut dapat dipertimbangkan:

- 1) Penambahan jenis pengujian mekanik dan metalurgi, seperti:
 - Uji tarik (*tensile test*) untuk mengetahui kekuatan dan keuletan material pasca *PWHT*.
 - Uji impak (*Charpy V-Notch*) untuk menilai ketangguhan material terutama pada daerah *HAZ*.
 - Uji metalografi dan mikroskopi optik untuk menganalisis perubahan struktur mikro secara langsung akibat pengaruh perlakuan panas.
 - Uji analisis komposisi kimia (*Chemical Analysis*) untuk mengetahui perubahan unsur yang terkandung pada material tersebut setelah proses pengelasan dengan proses *PWHT*.
- 2) Melakukan analisis tegangan sisa (*residual stress analysis*), untuk mengevaluasi efektivitas *PWHT* dalam mengurangi tegangan yang dapat menyebabkan retak. Untuk proses pengelasan harus dilakukan oleh *welder* yang profesional dan memiliki sertifikat.

6. Daftar Pustaka

- [1]. ANSI/NACE MR0175/ISO 1516-1:2020, (2020). *Petroleum And Natural Gas Industries – Materials For Use In H₂S- Containing Environments In Oil And Gas Production*.
- [2]. API 5L 46th Edition, (2020). *American Petroleum Institute*.
- [3]. ASTM E92-23, (2023). *Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*.
- [4]. AWS D1.1/D1.1M : 2020, (2020).

- Structural welding Code - Steel. American Welding Society.*
- [5]. Graciadiana. I. Huka, (2024). Analisa Pengaruh Variasi Kuat Arus Pengelasan *Flux Cored Arc Welding (FCAW)* Terhadap Sifat Kekerasan Pada Daerah *HAZ* Baja Karbon Rendah.
- [6]. Harsono Wiryosumarto & Toshie Okumura, (1996). Teknologi Pengelasan Logam.
- [7]. Hidayat, T. (2019). Pembahasan Studi Kasus Sebagai Bagian Metodologi Penelitian. [8]. M. Ichsan Rosidin Terhadap Sifat Mekanik.
- [8]. Nurhasan. (2020). Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* Terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Pengelasan *SMAW* Pada Baja Karbon S275J2.
- [9]. Universitas Batam. (2016). Buku Panduan Tugas Akhir dan Jurnal Fakultas Teknik.
- [10]. Viktor Naubnome. (2016). Pengaruh Pemanasan Menggunakan Pemanas Induksi Terhadap Kekerasan dan Struktur Mikro Material S50C.
- [11] Yuniarto. (2019). Analisis Pengaruh Variasi *Heat Input* Pengelasan *FCAW* Pada Sambungan Baja BKI Grade A
- [12]. Zona Mesin: Jurnal Teknik Mesin, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Batam. “*Current Issue*, Vol. 15 No. 2 (Agustus 2025).