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



**JURNAL TEKNIK PERKAPALAN**

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

ISSN 2338-0322

**Pengaruh *Post Weld Heat Treatment* pada Hasil Pengelasan SMAW Baja S50C dengan Elektroda E7018 Terhadap Kekuatan Tarik dan Ketangguhan Impak**

*Sarah Anggraini\*), Imam Pujo Mulyatno1), Hartono Yudo2), Berlian Arswendo Adietya3)*

*1)Laboratorium Teknologi Material, Las dan Produksi Kapal*

*Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro*

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

*\*)e-mail : sarahaarn31@gmail.com*

***Abstrak***

*Baja S50C merupaan baja karbon menengah yang kandungannya antara 0,47% sampai 0,53%. Baja S50C banyak digunakan dalam industri manufaktur dan teknik karena kombinasi kekuatan dan kemampuan mesin yang baik, contohnya poros (shaft). Penelitian ini bertujuan untuk mencari hasil perbandingan kekuatan tarik dan ketangguhan impak terhadap pengelasan sambungan baja S50C dengan polaritas AC dan DC+ yang dilakukan perlakuan Post Weld Heat Treatment dan tanpa Post Weld Heat Treatment. Metodenya menggunakan eksperiment, diawali dengan mencari baja, lalu pemotongan baja, pengelasan baja, pembuatan spesimen, sampai pengujian tarik dan impak di laboratorium. Penelitian ini menghasilkan bahwa pada pengujian tarik, tegangan maksimum tertinggi didapatkan oleh spesimen dengan tanpa perlakuan panas atau AC Tanpa PWHT dengan nilai sebesar 477.30 N/mm2, sedangkan nilai regangan tarik terbesar didapatkan oleh spesimen dengan perlakuan panas atau DC+ PWHT dengan nilai rata-rata regangan sebesar 19.2%, untuk nilai modulus elastisitas dan ketangguhan impak metode charpy tertinggi oleh spesimen perlakuan panas atau AC PWHT dengan hasil modulus elastisitas sebesar 30.7 Gpa dan hasil impak sebesar 1.22 J/mm2.*

*Kata Kunci : Baja S50C, SMAW, PWHT, Polaritas, Kekuatan Mekanis*

# **PENDAHULAN**

Baja S50C adalah baja karbon menengah dengan kandungan karbon berkisar antara 0,47% hingga 0,53%, Baja ini menunjukkan sifat mekanik yang sangat baik dengan kekuatan tarik 650 N/mm² [1], [2]. Baja S50C banyak digunakan dalam aplikasi termasuk suku cadang otomotif seperti roda gigi, dan poros (*shaft*). Sifat baja ini memungkinkan penyesuaian dalam kekuatan dan ketangguhan, sehingga cocok untuk berbagai keperluan industri [3], [4]. Dalam meningkatkan sifat mekaniknya, proses perlakuan panas seperti anil memainkan peran penting.

Anil adalah proses perlakuan panas yang melembutkan baja, meningkatkan kemampuan mesin, dan mengurangi tegangan internal, biasanya dilakukan pada suhu sekitar 550-650°C untuk S50C. Proses perlakuan panas ini memungkinkan optimalisasi sifat baja S50C, sehingga cocok untuk aplikasi yang menuntut di mana kekuatan dan ketangguhan diperlukan. Memahami parameter perlakuan panas sangat penting untuk mencapai keseimbangan sifat mekanik yang diinginkan dalam baja S50C, dan memastikan efektivitasnya dalam berbagai konteks industri [5], [6].

*Shields Metal Arc Welding* (SMAW) adalah proses pengelasan manual yang banyak digunakan yang menggunakan elektroda habis pakai yang dilapisi fluks untuk membuat las yang kuat, sangat cocok untuk berbagai logam, termasuk baja S50C. Elektroda ini menghasilkan busur listrik antara dirinya dan benda kerja, menghasilkan panas intens yang diperlukan untuk melelehkan elektroda dan logam dasar, sehingga membentuk sambungan las saat bahan cair mendingin dan mengeras [7], [8]. Dalam proses pengelasan dapat menghasilkan tegangan sisa yang tinggi pada sambungan, yang berpotensi menyebabkan distorsi atau bahkan retak setelah pengelasan. Tegangan sisa ini bisa diatasi dengan menggunakan metode pengendalian suhu seperti PWHT (*Post Weld Heat Treatment*) [9]. Penelitian ini menggunakan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) dalam proses yang diterapkan pada bahan yang dilas untuk meningkatkan sifat mekaniknya dan mengurangi masalah seperti kerapuhan dan tegangan sisa. metode anil penghilang tegangan, yang dilakukan pada suhu 600 °C selama 60 menit, telah terbukti sedikit menurunkan kekuatan luluh sambil meningkatkan perpanjangan pada sampel yang dilas, menunjukkan efek menguntungkan pada daktilitas [10], [11].

Penelitian ini menggunakan Polaritas dalam pengelasan yang merupakan faktor penting dalam mempengaruhi kualitas dan karakteristik las. Ini mengacu pada kutub positif atau negatif dari rangkaian listrik yang terbentuk ketika mesin las diaktifkan, yang secara langsung mempengaruhi proses pengelasan. Jenis daya listrik yang disuplai, yang dikenal sebagai daya input terpolarisasi, sangat penting untuk pengoperasian sistem pengumpan kawat las. Sistem ini membutuhkan polaritas tertentu yang ditentukan agar koneksi inputnya berfungsi dengan benar dan aman [12], [13]. Penelitian sebelumnya menggunakan salah satu polaritas umum yang digunakan dalam pengelasan adalah *Direct Current Electrode Positive* (DCEP), di mana elektroda terhubung ke terminal positif. Konfigurasi ini menghasilkan penetrasi yang lebih dalam dan konsentrasi panas yang lebih tinggi pada elektroda, yang bermanfaat untuk aplikasi pengelasan tertentu [14]. Sebaliknya, polaritas alternatif, *Direct Current Electrode Negative* (DCEN), menghasilkan lebih banyak panas pada benda kerja, mempengaruhi distribusi panas keseluruhan selama proses pengelasan [15]. Dalam penelitian ini, polaritas AC dan DC+ dalam perlakuan panas selama 60 detik dan juga tanpa menggunakan perlakuan panas. Setiap variasi menyebabkan hasil pengelasan yang berbeda, dengan polaritas DC+ (*Direct Current Positive*), menunjukan busur yang stabil, kualitas sambungan yang lebih baik, dan kekuatan sambungan yang optimal, serta mengurangi kemungkinan terjadinya cacat las [16], [17].

Untuk mengevaluasi kinerja mekanis baja yang diberikan perlakuan panas dengan variasi polaritas, dilakukan pengujian tarik dan pengujian impak. Uji tarik, yang dilakukan dengan standar ASTM E8 dan uji impak menggunakan standar ASTM E23, menggunakan tekanan hidrostatik yang diterapkan pada pegangan mesin untuk memastikan distribusi tegangan tarik yang seragam di seluruh spesimen [18], [19]. Penelitian ini menggunakan pendekatan pengujian multifaset untuk mengevaluasi sifat mekanik baja S50C dalam hasil pengelasan menggunakan polaritas an dengan perlakuan, mengintegrasikan uji tarik dan uji impak untuk memberikan analisis komprehensif tentang kekuatan dan ketangguhan [20], [21].

Penelitian ini berupaya untuk menyelidiki secara sistematis hasil pengelasan dengan variasi polaritas pengelasan pada sifat mekanis baja yang mengalami perlakuan panas dan tanpa perlakuan panas. Penelitian ini berfokus pada kuantifikasi degradasi kekuatan dan ketangguhan yang disebabkan oleh perlakuan panas pada variasi polaritas melalui pengujian mekanis yang terstandarisasi. Kekuatan tarik dilakukan menggunakan uji tarik yang dilakukan berdasarkan ASTM E8, sedangkan uji impak sesuai dengan ASTM E23, dilakukan untuk mengukur perubahan ketangguhan. Pengujian ini dirancang untuk menjelaskan perubahan signifikan dalam kinerja mekanis dan integritas struktural baja yang diakibatkan oleh hasil pengelasan dengan menggunakan polaritas AC dan DC+ terhadap perlakuan panas dan tanpa perlakuan panas.

# **METODE**

# **Pengumpulan Data**

Material pada penelitian ini merupakan baja dengan kandungan karbon menengah yaitu baja S50C. Material baja S50C banyak digunakan dalam industri manufaktur dan teknik karena kombinasi kekuatan dan kemampuan mesin yang baik, contohnya pada poros (*shaft*) kapal.

**Tabel 1. Kandungan Baja S50C**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| No | Unsur | Kandungn (%) |
| 1 | Karbon (C) | 0.47 – 0.53 |
| 2 | Mangan (Mn) | 0.60 – 0.90 |
| 3 | Fosfor (P) | 0.030 |
| 4 | Silikon (Si) | 0.15 – 0.35 |
| 5 | Sulfur (S) | 0.035 |

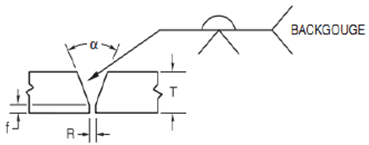
****

**Gambar 1. Plat Baja S50C**

**Plat Baja S50C merupakan baja kandungan karbon** **menengah. Baja ini mempunyai titik didih sekitar 3000°C dan titik lebur mencapai 1520°C.**

* 1. **Pengelasan**

Baja S50C dilakukan dengan pengelasan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) pada arus 90A dengan menggunakan polaritas AC dan DC+. Standar AWS NUMBER 3 [22]. dilaksanakan pada pengelasan posisi 1G dan menggunakan sambungan *Single* kampuh V *Butt Joint* dengan dilakukannya pada sudut 60°**.**

****

**Gambar 2.** Sambungan *Single* kampuh V*- Butt Joint*

**Penelitian ini mengaplikasikan pengelasan SMAW dengan parameter berikut: elektroda jenis E7018 dengan 2,6 mm diameter, tegangan antara 20-30 V. Proses pengelasan SMAW sampai pembuatan spesimen dilaksanakan di Inlastek Welding Institute, Surakarta Jawa Tengah.**

* 1. **Pembuatan Spesimen Uji Tarik**

**Setelah pengelasan pada baja S50C selesai, spesimen akan dipotong sesuai dengan ukuran standarnya ASTM E8 [23]. Sebanyak 20 spesimen tarik, dengan dimensi 200 mm x 20 mm x 10 mm. Pengujian tarik dilakukan di Laboratorium Struktur dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro, dengan menggunakan Mesin Uji Universal (UTM). Prosedur eksperimen dimulai dengan penandaan setiap masing-masing spesimen sesuai dengan variasi yang dilakukan sebelum pengujian. Menyiapkan mesin uji dan sistem komputer terkait. Selanjutnya spesimen akan dijepit dengan kuat pada suatu grip dalam mesin uji tarik dan dikenakan beban tarik, yang diterapkan secara bertahap dari beban awal 0 kg sampai terjadi fraktur.**

**Parameter yang dievakuasi dalam pengujian tarik meliputi kekuatan tarik, regangan dan modulus elastisitas [24], [25]. Dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:**

1. **Tegangan (σ)**

**Tegangan tertinggi oleh material yang ditahan sebelum mengalami patahan. Rumus kekuatan tarik maksimum:**

**σ = (1)**

**Keterangan:**

**σ = Tegangan tarik maksimum (Mpa)**

**P = Beban Maksimum (N)**

**Ao = Luas pada penampang awalan (mm²).**

1. **Regangan (e)**

**Peningkatan panjang terbesar atau perubahan panjang setelah menjalani pengujian tarik pada material dibandingkan dengan panjang pada spesimen awalnya.**

***ε =***

***ε =*  (2)**

**Keterangan:**

***Li* = Panjang sesudah patahan (mm)**

***Lo* = Panjang awalan pada spesimen (mm)**

***ε*  = Regangan (%).**

1. **Modulus Elastisitas**

**Diukur dan dihitung dengan grafik pada suatu tegangan hingga regangan pada kekakuan sebuah material [26]. Berdasarkan kemiringan pada garis elastis yang bersifat linier pada grafik tersebut.**

***E =*  (3)**

**Keterangan:**

***E* = Modulus elastisitas (Mpa)**

***σ* = Tegangan tarik Maksimum (KN/mm²)**

***ε* = Regangan pada tarik (%).**

|  |
| --- |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |

**Gambar 3. (a) Dimensi Ukuran Spesimen Spesimen Uji Tarik, (b) Spesimn Uji Tarik, (c) *Universal Testing Machine* (UTM)**

* 1. **Pembuatan Spesmen Uji Impak**

**Penelitian ini selain dilakukan pada uji tarik, juga dilakukan pada uji ketangguhan melalui uji impak dengan menggunakan alat uji impak *Charpy* [27]. Uji impak berfungsi untuk menilai kerapuhan materia dengan pembuatan spesimen sesuai standar ASTM E23 [28]. Dengan dimensi 55 mm x 10 mm x 10mm, yang dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro. Prosedur eksperimen dimulai dengan penandaan setiap masing-masing spesimen sesuai dengan variasi yang dilakukan sebelum pengujian dan menyiapkan mesin uji pada impak. Selanjutnya spesimen akan diletakkan horizontal dengan takikkan menghadap ke belakang dan pemukulan terjadi di bagian tengah spesimen.**

|  |
| --- |
|  |
| **(a)** |
|  |
| **(b)** |
|  |
| **(c)** |
| Gambar 4. (a) Dimensi Ukuran Spesimen Spesimen Uji Impak, (b) Spesimn Uji Impak, (c) Alat Impak Test |

* 1. **Penerapan Perlakuan Panas**

**Selesainnya spesimen pengujian dibuat, selanjutnya melakukan proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) yang dilakukan pemanasan kembali sebuah material yang dilakukan di dalam tungku furnace dengan kapasitas maksimal 1100°C, dengan pengunaan suhu pada penelitian ini menggunakan suhu 600˚C selama 60 menit [29], [30]. Menggunakan stopwatch pada handphone. Proses ini menyebabkan perubahan pada struktur dan grain material akibat pemanasan dan pendinginan. Tegangan sisa yang tinggi terjadinya pada tidak meratanya struktur, yang membuat material lebih keras namun mengurangi ketangguhannya dan meningkatkan keuletannya. PWHT dilakukan untuk memperbaiki keuletan, mengurangi tegangan tarik, dan meningkatkan ketangguhan material. Penggunaan tungku *furnace* dilakukan di Laboratorium Pengelasan Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro. Setelah penahanan selesai, material didinginkan pada suhu ruang sekitar 28°C-30°C dengan cara mengeluarkannya dari oven menggunakan alat penjepit.**

|  |
| --- |
|  |
|  |
| Gambar 5. Tungku Furnace |

# **HASIL DAN PEMBAHASAN**

# **Hasil Pengujian Tarik**

|  |
| --- |
|  |
| (a) |
|  |
| (b) |
|  |
| (c) |
|  |
| (d) |

Gambar 6. Load – Displacement (a) Spesimen AC PWHT, (b) Spesimen AC Tanpa PWHT, (c) Spesimen DC+ PWHT, (d) Spesimen DC+ Tanpa PWHT

Gambar 6 menunjukkan pengaruh perbandingan load - displacement pada variasi polaritas pengelasan AC dan DC+ dengan perlakuan panas dan tanpa perlakuan panas terhadap kekuatan tarik suatu material yang dilihat dalam karakteristik respon gaya terhadap perpindahan. Pada gambar 6 (a) kurva menunjukkan kekuatan maksimum sekitar 55.000 N, pada gambar 6 (b) AC Tanpa PWHT mengalami peningkatan mencapai gaya maksimum sekitar 61.000 N, sedangkan pada gambar 6 (c) dan (d) DC+ PWHT dan Tanpa PWHT memiliki kesamaan kekuatan maksimum sekitar 59.000 N. Sehingga dalam polaritas pengelasan yang terjadi bahwa pada polaritas AC Tanpa PWHT mengalami kekuatan maksimum tertinggi dibandingkan dengan penggunaan polaritas pengelasan pada DC+ Tanpa PWHT maupun dengan PWHT.

|  |
| --- |
|  |
| (a) |
|  |
| (b) |
|  |
| (c) |
|  |
| (d) |
| Gambar 7. Strees – Strain (a) Spesimen AC PWHT, (b) Spesimen AC Tanpa PWHT, (c) Spesimen DC+ PWHT, (d) Spesimen DC+ Tanpa PWHT |

Gambar 7 (a) merupakan kurva stress-strain, dengan memperlihatkan pola yang serupa. Spesimen AC PWHT memiliki nilai tegangan maksimum 432,789 MPa, pada gambar 7 (b) spesimen AC Tanpa PWHT nilai tegangan maksimum mengalami peningkatan sebesar 477,302 MPa, sedangkan pada gambar 7 (c) spesimen DC+ PWHT memiliki nilai tegangan maksimum 447,179 MPa, sementara gambar 7 (d) spesimen DC+ Tanpa PWHT mengalami peningkatan nilai tegangan tarik maksimum sebesar 451,283 Mpa. Sehingga dalam polaritas pengelasan yang terjadi bahwa pada polaritas AC Tanpa PWHT mengalami tegangan maksimum tertinggi dibandingkan dengan penggunaan polaritas pengelasan pada DC+ Tanpa PWHT.

|  |
| --- |
|  |
| (a) |
|  |
| (b) |
|  |
| (c) |
|  |
| (d) |

Gambar 8. (a) Spesimen AC PWHT, (b) Spesimen AC Tanpa PWHT, (c) Spesimen DC+ PWHT, (d) Spesimen DC+ Tanpa PWHT

|  |
| --- |
|  |
| (a) |
|  |
| (b) |
|  |
| (c) |
|  |
| (d) |
|  |
| (e) |
| Gambar 9. (a) Yield Strength, (b) Yung Modulus, (c) Ultimate Strength, (d) Fracture Strength, (e) Fracture Energy |

Pada gambar 9 menjelaskan hasil parameter perhitungan uji tarik dari masing-masing perlakuan panas, dimana pada gambar (a), tegangan maksimum yang dapat ditahan dari masing-masing material sebelum mengenai deformasi plastis permanen (*yield strength*) menunjukkan bahwa pada polaritas AC Tanpa PWHT memiliki nilai tertinggi 346.476 MPa dibandingkan AC dengan perlauan panas. dimana pada polaritas DC+ Tanpa PWHT memiliki nilai tertinggi 340.774 Mpa dibandingkan DC+ dengan PWHT. Sehingga yield strength pada variasi yang memiliki nilai tertinggi adalah DC+ Tanpa perlakuan panas dibandingkan dengan polaritas pada AC. Kemudian pada parameter kekakuan material (modulus elastisitas lentur) pada gambar 9 (b), AC Tanpa PWHT memiliki nilai tertinggi dengan nilai 2.066 Gpa dibandingkan AC dengan perlakuan panas dan pada DC+ PWHT mengalami nilai tertinggi sebesar 2.000 Gpa dibandingkan DC+ Tanpa PWHT. Sehingga young modulus pada variasi yang memiliki nilai tertinggi adalah AC tanpa perlakuan panas dibandingkan DC+ pada PWHT. Selanjutnya pada gambar 9 (c) kekuatan maksimum pada AC Tanpa PWHT memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan AC PWHT, dengan nilai 477.502 Mpa. Sementara DC+ Tanpa PWHT juga memili nilai tinggi dibandinkan dengan DC+ PWHT, dengan nilai 452.238 Mpa. Sehingga kekuatan maksimal pada variasi yang memiliki nilai tertinggi adalah AC tanpa perlakuan panas dibandingkan variasi lain dengan perlakuan. Pada gambar 9 (d) menjelaskan kemampuan regangan akhir sebelum material patah (*fracture strain*), bahwa pada AC Tanpa PWHT lebih unggul dibandingkan variasi lain dengan nilai 0.332, dengan penuruna nilai pada variasi DC+ Tanpa PWHT dengan nilai 0,283. Dan pada gambar 9 (e) untuk menghitung ketangguhan metrial pada masing-masing perlakuan panas, dihitung energi total yang diserap oleh material hingga patah (*fracture energy*), dimana nilai ini didapat dari luas dibawah grafik stress-strain dari awal hingga patah. Didapatkan bahwa, ketangguhan material dengan AC Tanpa PWHT memiliki hasil tertinggi dengan nilai 96.260 mJ/m3, dan menurun dengan nilai 69.416 mJ/m3 pada DC+ Tanpa PWHT.

# **Hasil Pengujian Impak**

Pengujian impak akan mendapatkan nilai ketangguhan dari hasil material S50C pada variasi polaritas pada perlakuan panas. Pengujian impak ini menggunakan standar ASTM E23.

|  |  |
| --- | --- |
|  | |
| (a) | |
|  | |
| (b) | |
|  |  |
|  |  |
| (c) | |
| Gambar 10. (a) Grafik Impact Strength (b) Grafik Absorbed Energy, (c) Spesimen Uji Impak | |

Berdasarkan hasil pengujian impak yang telah dilaksanakan dapat dilihat pada Gambar 10. Bahwa hasil pengelasan AC PWHT mendapatkan hasil 1.22 J/mm². Lebih besar dari AC Tanpa PWHT AC dengan hasil 1.11 J/mm². Sementara pada DC+ PWHT menghasilkan nilai impak 0.75 J/mm², lebih kecil dibandingkan DC+ Tanpa PWHT dengan hasil 0.86 J/mm². Hasil dalam impak pada nilai tertinggi diperoleh spesimen AC PWHT dan DC+ Tanpa PWHT. Kemudian nilai menurun pada spesimen pada perlakuan Tanpa PWHT AC dan DC+ PWHT. Jadi hasil impak memiliki hasil maksimal pada spesimen AC PWHT.

# **KESIMPULAN**

Berdasarkan tugas akhir ini yang telah dikerjakan mendapatkan suatu kesimpulan mengenai pengaruh PWHT pada sambungan las SMAW baja S50C dengan variasi polaritas terhadap kekuatan tarik dan ketangguhan impak. Berdasarkan hasil eksperimen yang dilakukan, berdasarkan pengaruh polaritas dan perlakuan panas secara keseluruhan, bahwa penggunaan polaritas AC tanpa PWHT memberikan hasil yang lebih baik dalam hal kekuatan tarik, sedangkan polaritas AC dengan PWHT menunjukkan ketangguhan impak yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa polaritas pengelasan dan perlakuan panas yang tepat dapat mempengaruhi sifat mekanik baja S50C yang dilas.

# **DAFTAR PUSTAKA**

[1] “Sae 1049, jis s50c steel,” *Alloy digest*, vol. 71, no. 12, 2022, doi: 10.31399/asm.ad.cs0237.

[2] J. Li *et al.*, “Cold-rolled medium-carbon high-strength steel belt S50C and production method for same,” 2019.

[3] M. H. A. Munandar, K. Kardiman, and D. T. Santoso, “Pengaruh Variasi Holding Time Pada Proses Heat Treatment (Hardening) Untuk Baja S50c Sebagai Pisau Mesin Pencacah Kayu,” *Jurnal Mesin Nusantara*, vol. 6, no. 2, pp. 127–136, 2023, doi: 10.29407/jmn.v6i2.20304.

[4] P. and C. P. and T. C. Klaywanna Kanda and Kumkoon, “Comparative Study of Mechanical Properties for Steel S50C by Induction Heating Application,” in *Advanced in Creative Technology- added Value Innovations in Engineering, Materials and Manufacturing*, S. and B. S. and S. P. and B. A. D. L. and B. A. and X. M. A. Janmanee Pichai and Chujuarjeen, Ed., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 67–75.

[5] Y. Feng, J. Liang, R. Zhang, Z. Song, D. Zhao, and J. Yin, “Method for producing annealing-free hot rolling S50C plate and strip,” 2012.

[6] T. Yao, Z. Sui, and S. Janaswamy, “Annealing,” 2023, pp. 73–89. doi: 10.1007/978-981-99-5390-5\_5.

[7] M. F. Buchely, H. A. Colorado, and H. E. Jaramillo, “Effect of SMAW manufacturing process in high-cycle fatigue of AISI 304 base metal using AISI 308L filler metal,” *J Manuf Process*, vol. 20, pp. 181–189, 2015, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2015.08.005.

[8] C. W. Noor, M. Ferry, and W. B. W. Nik, “A Study of Software Approach for Predicting Weld Bead Geometry in Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Process,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 554, pp. 386–390, 2014, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.554.386.

[9] B. E. Johnson and A. Hoger, “The use of a virtual configuration in formulating constitutive equations for residually stressed elastic materials,” *J Elast*, vol. 41, no. 3, pp. 177–215, 1995, doi: 10.1007/BF00041874.

[10] H. E. Emre and R. Kaçar, “Effect of Post Weld Heat Treatment Process on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Welded Dissimilar Drill Pipe,” *Materials Research-ibero-american Journal of Materials*, vol. 18, no. 3, pp. 503–508, 2015, doi: 10.1590/1516-1439.308114.

[11] S. T. Suherman and I. Abdullah, *TEKNIK PENGELASAN (CARA MENGHINDARI CACAT LAS)*. [Online]. Available: http://umsupress.umsu.ac.id/

[12] A. V. B. Salsich and E. G. Beistle, “Polarity sensing welding wire feeder system and method,” 2013. [Online]. Available: https://patents.google.com/patent/US20130327751A1/en

[13] C. S. Knoener and R. Woodward, “System and method for determining attachment and polarity of a welding electrode,” 2013. [Online]. Available: https://patents.google.com/patent/US9566657B2/en

[14] E. Takahashi, Y. Tsutsumi, K. Okuyama, and F. Ogata, “Partial discharge characteristics of oil-immersed insulation systems under DC, combined AC-DC and DC reversed polarity voltage,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 95, no. 1, pp. 411–420, 1976, doi: 10.1109/T-PAS.1976.32119.

[15] J. Hasil *et al.*, “JURNAL TEKNIK PERKAPALAN Analisa Kekuatan Tarik dan Impak Hasil Las SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Pada Baja ASTM A36 Dengan Variasi Polaritas dan Besar Arus Pengelasan,” *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 9, no. 4, p. 360, 2021, [Online]. Available: https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval

[16] J. Cho, J. Lee, and S.-H. Bae, “Heat input analysis of variable polarity arc welding of aluminum,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 81, no. 5, pp. 1273–1280, 2015, doi: 10.1007/S00170-015-7292-Y.

[17] A. Sentana, M. Firman, F. Subki, M. A. Amat, A. S. Baskoro, and G. Kiswanto, “The Effect of Polarity and Current Strength on Multilayer Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Based Tungsten Inert Gas (TIG) Welding using ER5356 and ER1100 Welding Wire on SS316 Plates,” 2024.

[18] B. M. Gliner, “I – the mechanical testing of metals,” 1960, pp. 1–123. doi: 10.1016/B978-1-4832-0050-7.50006-X.

[19] Q. Bai, Q. Bai, K. Cheng, B. He, and Y. Liang, “Design of a novel tensile testing device and its application in tensile testing experiments on copper micro wires,” vol. 226, no. 9, pp. 1594–1600, 2012, doi: 10.1177/0954405412454058.

[20] J. Pelleg, “Mechanical Testing of Materials,” Springer, Dordrecht, 2013, pp. 1–84. doi: 10.1007/978-94-007-4342-7\_1.

[21] J. Cornu, “Mechanical Testing of Welds,” Springer Berlin Heidelberg, 1988, pp. 35–48. doi: 10.1007/978-3-662-11049-2\_5.

[22] E. L. MCCOMBS, “Structural Welding Code-Steel. American Welding Society (AWS) D1,” 2002.

[23] A. I. ZwickRoell, *ASTM E8/E8M-24: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. USA: ASTM International, PA, 2024.

[24] W. Ramberg and W. R. Osgood, “Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters,” 1943, [Online]. Available: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930081614/downloads/19930081614.pdf

[25] V. A. Shvetsova and B. Margolin, “Stress-strain curves of polycrystals: Analysis of hardening and softening,” *Strength of Materials*, vol. 27, no. 10, pp. 580–591, 1995, doi: 10.1007/BF02215825.

[26] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, “The Elastic Moduli,” 2012, pp. 29–53. doi: 10.1016/B978-0-08-096665-6.00003-9.

[27] K. Li-Na, “Impact testing device,” 2013. [Online]. Available: https://www.freepatentsonline.com/y2013/0239654.html

[28] A. I. ZwickRoell, *ASTM E23-23a: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. USA: ASTM International, PA, 2023.

[29] T. Balamurugan, “Post Weld Heat Treatment,” 2018.

[30] X. Hu, Q. Ma, Y. Yang, Z. Xu, and Y. Li, “Effect of Postweld Heat Treatment on Microstructure and Properties of Thick S11306 Ferritic Stainless Welded Joints,” *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/met13010081.