

PENGARUH VARIASI POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT) TERHADAP SIFAT MEKANIK BAJA AISI 1045 HASIL PENGELASAN GMAW

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin
Pada Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Disusun oleh:

Dico Martdiansyah

2307230196P



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

MEDAN

2025

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dico Martdiansyah

Tempat/Tanggal lahir : Medan, 14-03-2002

NPM : 2307230196P

Fakultas : Teknik

Program Studi : Teknik Mesin

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya bahwa laporan tugas akhir saya yang berjudul :

“Pengaruh Variasi Post Weld Heat Treatment (PWHT) Terhadap Sifat Mekanik Baja Aisi 1045 Hasil Pengelasan GMAW”

Bukan merupakan plagiarisme mencuri hasil karya milik orang lain dan bukan hasil kerja orang lain untuk kepentingan diri saya sendiri karena hubungan maerial dan non material ataupun segala kemungkinan hal lainnya yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis tugas akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemungkinan hari diduga kuat ada tidak sesuai antara fakta dengan kenyataan ini saya bersedia di proses oleh tim fakultas yang di bentuk untuk melakukan verifikasi dengan sanksi berupa pembatalan kelulusan keserjanaan saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak ada atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di program studi teknik mesin, Fakultas Teknik, Univeristas Muhammadiyah Sumatera Utara

Medan, 30 September 2025

menyatakan



Dico Martdiansyah

Pengaruh Variasi Post Weld Heat Treatment (Pwht) Terhadap Sifat Mekanik Baja Aisi 1045 Hasil Pengelasan Gmaw

The Effect of Post Weld Heat Treatment (PWHT) Variations on the Mechanical Properties of AISI 1045 Steel from GMAW Welding Results

Dico Martdiansyah¹, Sudirman Lubis²

¹²Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jl. Kapt. Mukhtar Basri No. 3 Medan Sumatera Utara 20238 – Indonesia

e-mail: dicomartdiansyah123@gmail.com¹ , sudirmanlubis@umsu.ac.id²

Abstrak

Penelitian ini mengkaji pengaruh perlakuan panas pasca-pengelasan (Post Weld Heat Treatment – PWHT) terhadap sifat mekanik baja AISI 1045, khususnya kekuatan tarik dan kekerasan, pada berbagai suhu perlakuan. Hasil uji tarik menunjukkan bahwa peningkatan suhu PWHT cenderung menurunkan kekuatan tarik material. Pada suhu 600°C, kuat tarik mencapai 632,62 N/mm², kuat luluh 408,08 N/mm², dan elongasi 5,76%. Pada suhu 700°C, kuat tarik menurun menjadi 551,89 N/mm², kuat luluh meningkat menjadi 433,74 N/mm², dan elongasi meningkat menjadi 7,45%. Sementara itu, pada suhu 800°C, kuat tarik terus menurun hingga 518,86 N/mm², kuat luluh turun signifikan menjadi 306,35 N/mm², dan elongasi berkurang menjadi 4,8%. Pengujian kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan terendah terjadi pada suhu 600°C dengan Base Metal (200,7 HV), Weld Area (220,4 HV), dan HAZ (206,9 HV). Sementara itu, nilai kekerasan tertinggi tercatat pada suhu 800°C dengan Base Metal (214,3 HV), Weld Area (240,3 HV), dan HAZ (223 HV). Nilai kekerasan tertinggi pada Weld Area diperoleh pada suhu 700°C (263,5 HV). Secara keseluruhan, semakin tinggi suhu PWHT, kekerasan material meningkat, tetapi kekuatan tarik mengalami penurunan, menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan kerapuhan material. Penelitian ini menegaskan bahwa PWHT memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanik baja AISI 1045, di mana kenaikan suhu perlakuan meningkatkan kekerasan tetapi menurunkan kekuatan tarik. Oleh karena itu, pemilihan suhu PWHT yang optimal perlu dipertimbangkan untuk menjaga keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan material dalam aplikasi Teknik.

Kata kunci: PWHT, AISI 1045, Kekuatan Tarik, Pengelasan

Abstract

The paper is written fully in Bahasa Indonesia (except the abstract is written in English) using Times New Roman font type, 12 font size and single row space. The paper size is A4 (21 × 29.7 cm) and the author is recommended not to write more than 10 pages. The main article content covers abstract, introduction, literature review, method, result, and conclusion. Pictures, tables and equations can be included in the article. Top, bottom, and right / left margin of the paper are 2.54 cm, respectively. The

number of words in the abstract is around 200 words. The abstract should mention briefly the background, objectives, method, and main conclusions. Following the abstract, write down five keywords for indexing. An unusual abbreviation should be defined clearly after the first mention. This study examines the effect of Post Weld Heat Treatment (PWHT) on the mechanical properties of AISI 1045 steel, particularly tensile strength and hardness, at various treatment temperatures. The tensile test results show that increasing the PWHT temperature tends to decrease the tensile strength of the material. At 600°C, the tensile strength reached 632.62 N/mm², yield strength 408.08 N/mm², and elongation 5.76%. At 700°C, the tensile strength decreased to 551.89 N/mm², the yield strength increased to 433.74 N/mm², and the elongation increased to 7.45%. Meanwhile, at 800°C, the tensile strength continued to decrease to 518.86 N/mm², the yield strength dropped significantly to 306.35 N/mm², and the elongation decreased to 4.8%. Hardness testing showed that the lowest hardness value occurred at 600°C with Base Metal (200.7 HV), Weld Area (220.4 HV), and HAZ (206.9 HV). Meanwhile, the highest hardness value was recorded at 800°C with Base Metal (214.3 HV), Weld Area (240.3 HV), and HAZ (223 HV). The highest hardness value in the Weld Area was obtained at 700°C (263.5 HV). Overall, the higher the PWHT temperature, the hardness of the material increased, but the tensile strength decreased, indicating an increasing trend in material brittleness. This study confirms that PWHT has a significant effect on the mechanical properties of AISI 1045 steel, where the increase in treatment temperature increases hardness but decreases tensile strength. Therefore, the selection of the optimal PWHT temperature needs to be considered to maintain a balance between hardness and toughness of the material in engineering applications.

Keywords : PWHT, AISI 1045, Tensile Strength, Hardness, Welding.

1. PENDAHULUAN

Di era saat ini, perkembangan teknologi dibidang konstruksi yang semakin maju tidak dapat dipisahkan dari pengelasan karena pengelasan mempunyai peran tersendiri yang sangat penting dalam rekayasa dan reparasi logam. Sumber energi pengelasan yaitu dengan menggunakan arus DC atau AC dari pembangkit listrik (trafo las) (Oktaviandy et al., 2023). Salah satu diantara jenis pengelasan yaitu Gas Metal Arc Welding (GMAW) yang merupakan sebuah proses pengelasan menggunakan gas pelindung CO₂ sebagai media pelindung weld metal dari udara luar. GMAW biasanya dioperasikan secara semi otomatis, sehingga dengan pesatnya perkembangan dunia kerja pekerjaan konstruksi, sehingga saat ini proses pengelasan dengan menggunakan GMAW banyak dipakai karena hasil dan kualitas dan lasan yang baik.

Selama pengelasan, masalah yang muncul adalah tegangan sisa yang dihasilkan dari panas pengelasan. Tegangan sisa ini bisa merendahkan kualitas material dan membuatnya menjadi rapuh yang tentu saja tidak diinginkan (Putra Nugraha et al., 2017)(Ganapati Iswarananda Duarsa, n.d.).

Selama pengelasan, masalah yang muncul adalah tegangan sisa yang dihasilkan dari panas pengelasan. Tegangan sisa ini bisa merendahkan kualitas material dan membuatnya menjadi rapuh yang tentu saja tidak diinginkan (Budiyanto et al., 2017). PWHT (Post Weld Heat Treatment) merupakan pemanasan setelah pengelasan yang bertujuan untuk memulihkan sifat mekanik pada logam dan melepaskan tegangan sisa yang telah terpengaruh oleh panas dari proses pengelasan. Proses PWHT memiliki kemampuan untuk melepas tegangan sisa pada material yang telah melalui proses pengelasan, mengurangi risiko kerusakan, dan secara seragam meratakan struktur mikro, sehingga mampu meningkatkan kualitas material tersebut (Budiyanto & Yuono, n.d.). Selain dengan PWHT, tegangan sisa juga dapat dikurangi dengan cara diberi beban impak berulang, dicairkan ulang, digerinda, dan diberi beban kejut dengan ultrasonik (Anwar & Mufarrih, 2018)(Augustino, 2015).

Baja karbon sedang salah satunya adalah baja AISI 1045 yang sering digunakan menjadi bahan utama pada baja konstruksi dan pembuatan kapal. Baja jenis ini memiliki kelebihan dalam kemampuan untuk meningkatkan sifat mekaniknya melalui perlakuan panas, namun juga memiliki kekurangan yaitu rentan terhadap retak las (Ari Ardiansah, 2019)(Zhao et al., 2016). Daerah Heat Affected Zone (HAZ) adalah permasalahan utama yang merupakan awal dari permasalahan yang kompleks. Hal ini terjadi karena struktur mikro yang terbentuk pada daerah tersebut akibat dari perbedaan perlakuan panas dan kondisi lingkungan (Rizal Fauzi & Arsyad, 2024).

Dalam penelitian ini, telah diamati pengaruh dari temperatur PWHT terhadap tegangan sisa hasil pengelasan GMAW yang dapat dilihat dari sifat mekaniknya. Menggunakan variasi temperatur PWHT 600°C, 700°C, dan 800°C pada waktu penahanan 1 jam.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen untuk mengetahui pengaruh suatu perlakuan terhadap variabel lain dalam kondisi yang terkontrol. Eksperimental adalah melakukan pengamatan di bawah kondisi buatan yang sengaja dibuat dan diatur oleh peneliti untuk menganalisa pengaruh variasi Post Weld Heat Treatmen (PWHT) pada proses pengelasan terkhusus GMAW terhadap sifat mekanik baja AISI 1045 (Vaithiyanathan et al., 2020)(Lubi & Susetyo, 2008).

1. Material plat baja AISI 1045 ketebalan 8 mm.
2. Menggunakan pengelasan GMAW dengan gas pelindung Argon Mix.
3. Menggunakan elektoda ER70S-6 ϕ 1,2 mm.
4. Kampuh las alur V (Single V Butt Joint) dengan sudut 60°.
5. Pengelasan dilakukan dengan posisi pengelasan 1G.
6. Kuat arus yang digunakan 130 Ampere.
7. Perlakuan Post Weld Heat Treatmen (PWHT) dengan temperatur berbagai temperatur suhu yaitu 600°C, 700°C, dan 800°C dengan waktu penahanan 1 jam, dan didinginkan pada suhu ruang (normal).
8. Standar pengujian Tarik ASTM E-8.
9. Standar pengujian Kekerasan ASTM E92

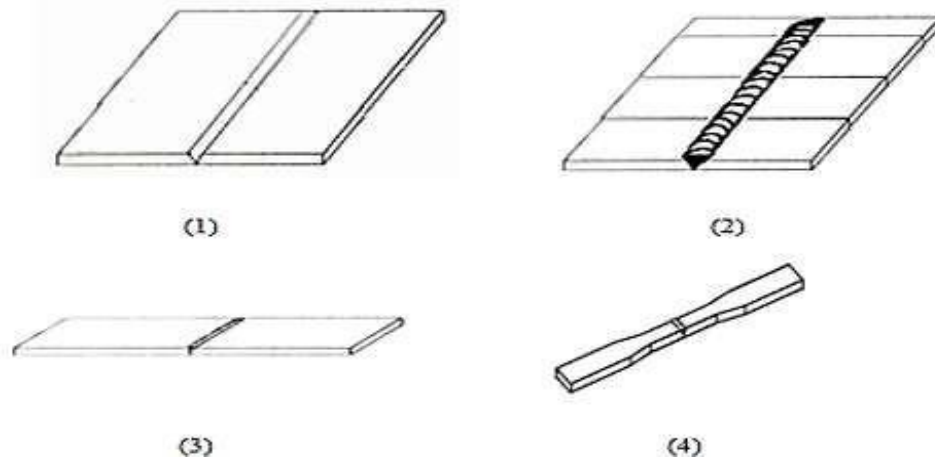
Kemudian dilakukan sebuah pengamatan terhadap hasil pengelasan material. Untuk lebih jelas terhadap komposisi baja AISI 1045 dapat dilihat pada tabel 1 dibawah ini.

Table 1. Komposisi Kimia Baja AISI 1045(jr. George, E. Deter, 1961)

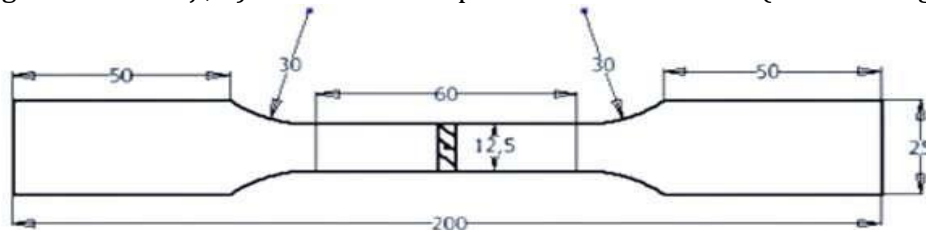
Kode	C%	SI%	Mn%	Mo%	P%	S%
AISI 1045	0,4-0,45	0,1-0,3	0,60-0,90	0,025	0,04 Max	0,05 Max

2.1. Pengujian Tarik

Spesimen hasil dipreparasi dengan gerinda tangan sehingga menjadi spesimen uji tarik sesuai standar ASTM E-8 sebagaimana terlihat pada gambar 2. Data hasil pengujian tarik digunakan untuk mengamati sifat mekanik hasil dari Post Weld Heat Treatmen (PWHT) pasca pengelasan(Zhao et al., 2016)(Lubi & Susetyo, 2008):



Gambar 1. Pengerjaan pembentukan specimen uji, 1) Pembuatan kampuh, 2) Pengelasan, 3) Pemotongan material uji, 4) Pembentukan specimen sesuai ukuran (Arief & Ningsih, 2023)



Gambar 2. Spesimen uji tarik sesuai standar ASTM E-8

2.3 Pengujian Kekerasan

Pengujian dengan metode kekerasan (Vickers) ini, yaitu menekan spesimen dengan indenter intan yang meninggalkan hasil jejak atau lekukan pada permukaan material. Pada pengujian metode kekerasan (Vickers) sesuai dengan ASTM E92 untuk mengetahui perbandingan nilai kekerasan akibat pengaruh variasi suhu PWHT pada area base metal, area HAZ, dan weld metal (Hilaqil S & Amiruddin, 2024). Pengujiannya dengan meletakkan material uji pada meja kerja, menekan indenter pada masing-masing lokasi yang diinginkan pada masing-masing spesimen dengan beban 100 gf dan dwell time 5 detik (Anwar & Mufarrih, 2018).

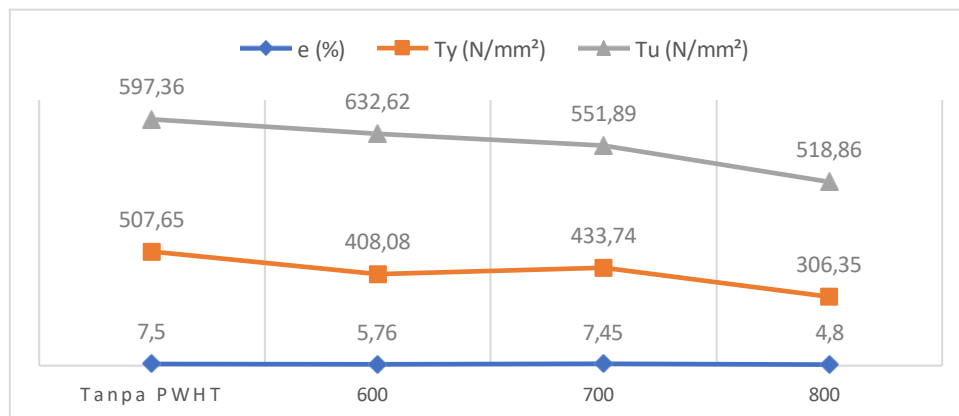
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian Tarik

Tabel 2. Hasil rata-rata uji tarik

No	Kode Spesimen	Lebar (W) mm	Tebal (T) mm	Luas (A) mm ²	Panjang Awal (Lo) mm	Panjang Akhir (Li) mm	Perubahan Panjang (ΔL) mm	Fy N	Fu N	Ty N/mm ²	Tu N/mm ²	e %	Ket
1	Tanpa	11,33	8,00	90,64	60,70	65,18	4,48	46600	60000	514,12	661,96	7,38	Putus Dilasan
2	PWHT	12,67	8,00	101,36	60,70	65,33	4,63	50800	54000	501,18	532,75	7,63	Putus Dilasan
Rata-Rata										507,65	597,36	7,50	
3	600	12,87	8,00	102,96	60,70	64,69	3,99	39600	66400	384,62	644,91	6,57	Putus Dilasan
4		12,05	8,00	96,4	60,70	63,70	3	41600	59800	431,54	620,33	4,94	Putus Dilasan
Rata-Rata										408,08	632,62	5,76	
5	700	12,96	8,00	103,68	60,70	64,44	3,74	41800	56000	403,16	540,12	6,16	Putus Dilasan
6		12,33	8,00	98,64	60,70	66,00	5,3	45800	55600	464,31	563,67	8,73	Putus Dilasan
Rata-Rata										433,74	551,89	7,45	
7	800	12,93	8,00	103,44	60,70	63,80	3,1	31800	54000	307,42	522,04	5,11	Putus Dilasan
8		12,12	8,00	96,96	60,70	63,43	2,73	29600	50000	305,28	515,68	4,50	Putus Dilasan
Rata-Rata										306,35	518,86	4,80	

Dari data pengujian tarik yang telah dilakukan kemudian disajikan tabel 2. diatas, berikut grafik yang telah dibuat untuk mempermudah membandingkan rata-rata nilai hasil pengujian tarik.



Gambar 3. Garfik hasil uji tarik seluruh spesimen

Dari hasil pengujian tarik nilai berupa kuat tarik, kuat luluh, dan elongasi yang menunjukkan hasil uji tarik. Dimana pengujian memvariasikan suhu PWHT, pada suhu 600oC nilai kuat tarik 632,62 N/mm², Kuat luluh 408,08 N/mm², dan elongasi 5,76%. Untuk suhu 700oC nilai kuat tarik 551,89 N/mm², Kuat luluh 433,74 N/mm², dan elongasi 7,45%. Dan pada suhu 800oC nilai kuat tarik 518,86 N/mm², Kuat luluh 306,35 N/mm², dan elongasi 4,8%. Hasil keseluruhan menunjukkan hasil dibawah nilai uji tanpa PWHT dan nilai ultimate strenght suhu 600oC menunjukkan nilai yang signifikan yaitu sebesar 35,26%. Perlakuan PWHT menunjukkan tren yang sama yaitu semakin menurun. Hal ini sejalan dengan bertambahnya suhu PWHT menunjukkan nilai hasil pengujian tarik mengalami penurunan.

Pada suhu PWHT suhu 600oC mengalami kenaikan kekuatan tarik sebesar 10,6% pada suhu PWHT 700oC mengalami penurunan kekuatan tarik sebesar 8,7% dan pada suhu PWHT 800oC kekuatan tarik material mengalami penurunan dengan kekuatan tarik sebesar 9,4%.

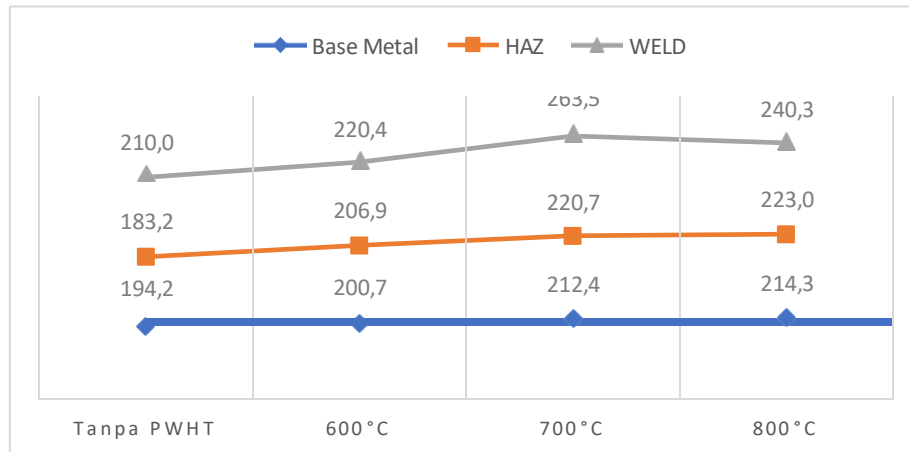
Sehingga dapat disimpulkan dengan perlakuan PWHT setelah proses pengelasan dapat mempengaruhi nilai kekuatan tarik material. Dengan bertambahnya suhu PWHT menyebabkan material getas dan kekuatan tarik menurun.

3.2. Hasil Kekerasan

Tabel 2. Hasil Uji Kekerasan Material

Spesimen		HVN
Tanpa PWHT	Base Metal	194,2
	HAZ	183,2
	Weld Metal	210,0
600°C	Base Metal	200,7
	HAZ	206,9
	Weld Metal	220,4
700°C	Base Metal	212,4
	HAZ	220,7
	Weld Metal	263,5
800°C	Base Metal	214,3
	HAZ	223,0
	Weld Metal	240,3

Dari nilai kekerasan yang diperoleh, maka dibuatlah grafik perbandingan nilai kekerasan dari beberapa variasi spesimen uji.



Gambar 4. Grafik hasil uji kekerasan tiap spesimen

Dari pengamatan pengujian kekerasan yang telah dilakukan pada material AISI 1045 dengan variasi suhu PWHT mempunyai nilai kekerasan terendah pada suhu 600°C dengan nilai sebesar pada base metal (200,7 HV), weld area (220,4 HV) maupun HAZ area (206,9 HV). Dan nilai kekerasan tertinggi pada suhu 800°C dengan nilai sebesar base metal (214,3 HV), weld area (240,3 HV) maupun HAZ area (223 HV). Pada area Base Metal nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada suhu PWHT 800°C dengan nilai 214,3 HV. Pada area Weld metal nilai kekerasan tertinggi di peroleh pada suhu PWHT 700°C dengan nilai sebesar 263,5 HV. Dan pada area HAZ nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada suhu PWHT 800°C dengan nilai 223 HV.

Dari hasil pengujian dan pengamatan yang sudah dilakukan pada pengujian kekesaran dengan variasi suhu PWHT kemudian ditarik kesimpulan bahwa perlakuan PWHT pasca pengelasan memberikan pengaruh yang sangat signifikan pada kekerasan material. Dimana semakin tinggi suhu PWHT nilai kekerasan material semakin meningkat

4. KESIMPULAN DAN SARAN

5.

PWHT berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik baja AISI 1045. Pada suhu 600°C, kuat tarik meningkat 10,6%, tetapi menurun pada suhu 700°C (8,7%) dan 800°C (9,4%). Kuat luluh tertinggi terjadi pada suhu 700°C (433,74 N/mm²) dan terendah pada suhu 800°C (306,35 N/mm²). Elongasi tertinggi pada suhu 700°C (7,45%) dan terendah pada suhu 800°C (4,8%), menunjukkan peningkatan kerapuhan pada suhu lebih tinggi. Kekerasan terendah terjadi pada suhu 600°C (Base Metal: 200,7 HV, Weld Area: 220,4 HV, HAZ: 206,9 HV), sedangkan kekerasan tertinggi terjadi pada suhu 800°C untuk Base Metal (214,3 HV) dan HAZ (223 HV), serta pada suhu 700°C untuk Weld Area (263,5 HV). Semakin tinggi suhu PWHT, kekerasan meningkat tetapi kekuatan tarik menurun, yang meningkatkan kerapuhan material. Oleh karena itu, suhu PWHT harus dipilih secara optimal untuk menjaga keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan baja AISI 1045.

DAFTAR RUJUKAN

Anwar, A., & Mufarrih, A. (2018). Analisa kuat arus SMAW dan media pendingin terhadap distorsi angular pada pelat ST 37. *[Prosiding/Artikel tidak dipublikasikan]*, 1–6.

- Ardiansah, Y. A. (2019). Studi hasil proses pengelasan FCAW (Flux Cored Arc Welding) pada material ST 41 dengan variasi media pendingin terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, 7(2), 9–16.
- Arief, F., & Ningsih, T. H. (2023). Pengaruh variasi holding time PWHT pada hasil pengelasan SMAW baja AISI 1045 terhadap nilai uji tarik. *Jurnal Inovasi Teknologi Manufaktur, Energi, dan Otomotif*, 2(1), 1–7.
- Augustino, I. F. (2015). Pengaruh lama waktu tunggu pada proses PWHT terhadap sifat mekanik, struktur mikro dan tegangan sisa pada pengelasan baja AAR M201 Gr.B+. [Tugas akhir tidak dipublikasikan].
- Budiyanto, E., Nugroho, E., & Masruri, A. (2017). Pengaruh diameter filler dan arus pada pengelasan TIG terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro pada baja karbon rendah. [Artikel ilmiah]. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:139207655>
- Budiyanto, E., & Yuono, L. D. (n.d.). *Proses manufaktur*. Eko Budiyanto. <https://books.google.co.id/books?id=NjJEEAAAQBAI>
- Duarsa, G. I. (n.d.). Pengaruh variasi temperatur PWHT pasca pengelasan SMAW terhadap sifat. [Artikel tidak dipublikasikan].
- Fauzi, Y. R., & Arsyad, M. (2024). Pengaruh perlakuan post weld heat treatment pada pengelasan MIG terhadap kekuatan tarik material baja AISI 1045. *Journal of Energy, Materials & Manufacturing Technology (JEMMTEC)*, 3(2), 9–14. <https://journal.atim.ac.id/>
- George, E. D. jr. (1961). *Mechanical metallurgy*. McGraw-Hill Book Company.
- Hilaqil, S. M. F., & Amiruddin, W. (2024). Analisis pengaruh durasi post weld heat treatment annealing pada pengelasan GMAW baja ST60 terhadap kekuatan uji tarik, uji impak, uji bending, dan struktur mikro. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 12(3), 1–11. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>
- Lubi, A., & Susetyo, F. B. (2008). Karakteristik sifat mekanik dan struktur mikro baja karbon sedang pasca perlakuan panas tempering. *Jurnal Teknik Mesin*, 7(1), 1–7.
- Nugraha, Y. D. P., Suharno, S., & Estriyanto, Y. (2017). Pengaruh proses post weld heat treatment (PWHT) pada pengelasan material paduan super berbasis nikel dengan metode tungsten inert gas (TIG) terhadap kekerasan dan struktur mikro. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik dan Kejuruan*, 10(2), 75–83. <https://doi.org/10.20961/jiptek.v10i2.16916>
- Oktaviandy, N. R., Kardiman, K., & Hanifi, R. (2023). Effect of preheat temperature variation with cooling media on mechanical properties in welding SS400 steel. *SINTEK Jurnal: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 17(2), 130–142. <https://doi.org/10.24853/sintek.17.2.130-142>
- Vaithyanathan, V., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Petley, V., & Verma, S. (2020). Combined effect of gas tungsten arc welding process variants and post-weld heat treatment on tensile properties and microstructural characteristics of Ti-6Al-4V alloy joints. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 9(2), 194–211. <https://doi.org/10.1007/s13632-020-00631-8>
- Zhao, M. S., Chiew, S. P., & Lee, C. K. (2016). Post weld heat treatment for high strength steel welded connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 122, 167–177. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.03.015>