



Sifat Ketangguhan Baja ST 42 Pasca *Post Welding Heat Treatment* dengan Media Pendingin Minyak Kelapa pada Variasi *Holding Time*

Nitha^{1✉}, Anis Tandira¹, Fikran¹, Yafet Bontong¹, Nofrianto Pasae¹, Petrus Sampelawang¹

⁽¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Kristen Indonesia Toraja, Indonesia

DOI: [10.31004/jutin.v9i1.55185](https://doi.org/10.31004/jutin.v9i1.55185)

✉ Corresponding author:
[nithan039@gmail.com]

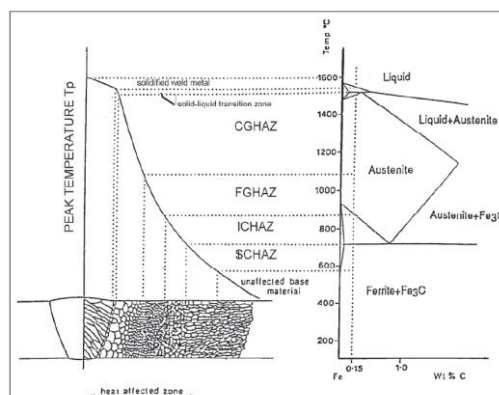
Article Info	Abstrak
<p><i>Kata kunci:</i> <i>Temperatur heat treatment;</i> <i>Holding time;</i> <i>Pendingin minyak kelapa;</i> <i>Ketangguhan;</i> <i>PWHT;</i> <i>Baja ST 42</i></p>	<p><i>Post Weld Heat Treatment (PWHT) pada perlakuan panas, waktu penahanan (holding time), temperatur pemanasan, dan laju pendinginan merupakan faktor yang sangat penting. PWHT dimaksudkan juga untuk pelepasan tegangan sisa (stress relieving) sehingga pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh holding time dengan media pendingin minyak kelapa pada PWHT terhadap ketangguhan baja ST 42. Metode penelitian yang digunakan yakni metode eksperimen dengan perlakuan panas temperatur 590oC, holding time 1,2,3,4,5 jam dan media pendingin minyak kelapa, setelah dilakukan pengelasan SMAW pada arus 120A, elektroda E6013, posisi bawah tangan, kampuh V. Kemudian dilakukan pengujian ketangguhan metode Charpy. Material baja yang digunakan adalah ST 42. Dari hasil penelitian diperoleh bahwa holding time berpengaruh terhadap ketangguhan baja PWHT dimana nilai ketangguhan terendah sebesar 0,84 J/mm2 pada holding time 5 jam dan tertinggi dengan holding time 1 jam nilai ketangguhan sebesar 1,366 J/mm2. Hal ini membuktikan bahwa semakin tinggi lama penahanan dalam tungku semakin menurun nilai ketangguhan material baja ST 42 yang telah mengalami PWHT temperatur 590°C.</i></p>
<p><i>Keywords:</i> <i>Heat treatment temperature;</i> <i>Holding time;</i> <i>Coconut oil cooler;</i> <i>Toughness;</i> <i>PWHT;</i> <i>ST 42 steel</i></p>	<p>Abstract <i>Post-Weld Heat Treatment (PWHT) is applied in heat treatment processes, holding time, heating temperature, and cooling rate are very important factors. PWHT is also intended to relieve residual stresses (stress relieving). Therefore, this study aims to determine the effect of holding time with coconut oil as the cooling medium in PWHT on the toughness of ST 42 steel. The research method employed was an experimental method using a heat treatment temperature of 590°C, holding times of 1, 2, 3, 4, and 5 hours, and coconut oil as the cooling medium, after SMAW welding at a current of 120 A, using an E6013 electrode, flat welding position, and V-groove joint. Subsequently, toughness testing was carried out using the Charpy impact method. The steel material used in this study was ST 42. The results showed</i></p>

that holding time affected the toughness of PWHT-treated steel, where the lowest toughness value was 0.84 J/mm² at a holding time of 5 hours, and the highest toughness value was obtained at a holding time of 1 hour, with a toughness value of 1.366 J/mm². This proves that a longer holding time in the furnace leads to a decrease in the toughness of ST 42 steel subjected to PWHT at a temperature of 590°C.

1. PENDAHULUAN

Banyak peralatan produksi yang menggunakan baja hal ini dikarenakan sifat material baja yang kuat dan tahan lama. Baja merupakan salah satu jenis logam yang paling banyak digunakan dalam bidang teknik dan dapat di sesuaikan dengan kebutuhan karena banyak macam dengan sifat dengan karakter yang berbeda. Karbon merupakan unsur utama untuk menguatkan baja, sehingga baja harus mengandung karbon sampai kadar tertentu. Ketangguhan material baja menjadi sifat yang cukup penting untuk ditingkatkan. Hal ini diperlukan agar dalam aplikasinya bahan baja mampu meredam atau menahan beban dampak tanpa menjadi rusak atau retak. Sifat ketangguhan merupakan kombinasi antara kuat tarik dan elongasi, kekuatan tinggi dengan elongasi yang tinggi pula akan menghasilkan ketangguhan material yang cukup baik (Ashby & Jones, 2012).

Untuk meningkatkan kekuatan dan ketangguhan dari baja, maka perlu dilakukan perlakuan panas terhadap baja tersebut. Dari berbagai macam proses produksinya, pengelasan merupakan salah satu proses yang banyak digunakan dikarenakan pelaksanaannya yang cukup mudah dan dapat dalam keadaan portable, namun menyebabkan beberapa masalah, salah satunya adalah terbentuknya cacat las dan tegangan sisa. Untuk mengurangi pengaruh tersebut yang dapat berdampak pada kualitas hasil pengelasan, maka dapat dilakukan perlakuan panas atau sering disebut *post weld heat treatment* (PWHT) (Smallman, & Bishop, 1999). Pada perlakuan panas, waktu penahanan (*holding time*), temperatur pemanasan, dan laju pendinginan merupakan faktor yang sangat penting. PWHT dimaksudkan juga untuk pelepasan tegangan sisa (*stress relieving*) (Nitha, 2019). Media pendingin merupakan suatu substansi yang berfungsi dalam menentukan kecepatan pendinginan yang dilakukan terhadap material yang telah diuji dalam perlakuan panas. Pendingin dan *holding time* dalam tungku menjadi salah satu alternatif untuk memperbaiki dan meningkatkan sifat mekanik pada material pasca pengelasan (Borgnakke et al., 2009). Pemilihan media pendingin dan *holding time* juga berguna dalam penentuan sifat dan fasa dari struktur yang terbentuk setelah material didinginkan. Hal ini menyebabkan peningkatan nilai ketangguhan dan nilai kekuatan tarik pada suatu bahan. Secara garis besar ada dua jenis media pendingin yang digunakan, yaitu media pendingin dengan tingkat kerapatan yang rendah dan media pendingin dengan tingkat kerapatan yang tinggi (Bart et al., 2013).



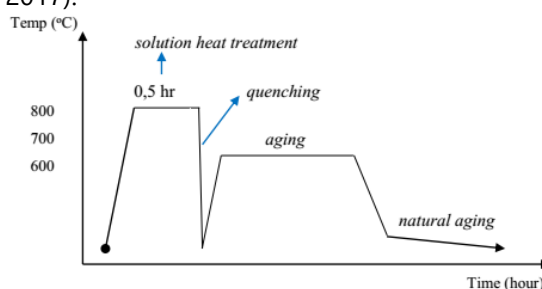
Gambar 1. Ilustrasi skematik dari berbagai wilayah HAZ satu lintasan dengan mengacu pada diagram kesetimbangan Besi-karbon (Márquez-Herrera & Moreno-Palmerin, 2021)

Dalam proses pengelasan akan didapat pemanasan yang tidak merata antara logam las, logam induk, dan daerah HAZ. Menurut (Boumerzoug et al., 2010), panas pengelasan dapat mengakibatkan bagian yang dilas mengalami pengembangan termal. Perbedaan pemanasan menyebabkan terjadinya perubahan sifat atau struktur, metalurgi yang rumit, dan deformasi. Perubahan ini dapat mengurangi kekuatan sambungan las sehingga harus dihindari. Untuk itu perlu dilakukan perlakuan panas kembali untuk mengatur kembali struktur dari material (Putra

Nugraha et al., 2017).

Perlakuan panas atau heat treatment merupakan suatu proses kombinasi antara proses pemanasan dan pendinginan suatu logam untuk memperbaiki sifat logam yang telah mengalami proses pengelasan untuk menghilangkan tegangan sisa akibat panas setelah di las Hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Pratama, 2022) menunjukkan bahwa perlakuan PWHT dan variasi media pendingin berpengaruh signifikan terhadap kekuatan bending pada hasil pengelasan SMAW. kekuatan bending rata-rata tertinggi dengan media pendingin udara sebesar 1273,26 MPa dan kekuatan bending terendah dengan media pendingin air sebesar 1196,34 MPa.

Penelitian sebelumnya juga tentang pengaruh PWHT terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada pengelasan *shield metal arc welding* (SMAW), dengan menggunakan alat pemanas induksi pada temperatur 400°C, 500 °C 600 °C, 700 °C dan 800 °C dengan holding time selama 15 detik dan didinginkan di udara terbuka, yang selanjutnya dilakukan pengujian impact, kekerasan dan struktur mikro. Dari hasil pengujian impact dan kekerasan diketahui bahwa semakin tinggi temperatur PWHT maka semakin tinggi juga nilai ketangguhan dan semakin menurun nilai kekerasannya. Dan dari pengamatan struktur mikro daerah *weld metal PWHT* mengakibatkan terjadinya peningkatan jumlah struktur acicular ferrite dan penurunan jumlah struktur widmanstatten ferrite (Haryadi et al., 2017).



Gambar 2. Hubungan antara Suhu dan Waktu Perlakuan terhadap Material (Putra Nugraha et al., 2017)

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen, yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas pasca-pengelasan (Post Weld Heat Treatment / PWHT) terhadap ketangguhan baja ST 42. Pendekatan eksperimen dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mengontrol variabel-variabel proses secara sistematis, sehingga hubungan sebab-akibat antara variasi holding time dan nilai ketangguhan material dapat dianalisis secara lebih akurat dan objektif.

Tahapan awal penelitian dimulai dengan proses pengelasan menggunakan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW). Proses pengelasan dilakukan dengan arus pengelasan sebesar 120 A menggunakan elektroda E6013, yang merupakan elektroda berlapis rutil dan umum digunakan untuk pengelasan baja karbon rendah. Pengelasan dilakukan pada posisi bawah tangan (flat position) dengan jenis sambungan butt joint dan kampuh berbentuk V. Pemilihan kampuh V bertujuan untuk memastikan penetrasi las yang optimal serta menghasilkan sambungan las yang homogen dan kuat, sehingga dapat merepresentasikan kondisi sambungan yang banyak digunakan pada aplikasi konstruksi dan fabrikasi.

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja karbon rendah ST 42. Baja ST 42 dipilih karena material ini banyak diaplikasikan pada industri konstruksi, permesinan, dan struktur baja, serta memiliki sifat mampu las yang baik. Setelah proses pengelasan selesai, spesimen uji dipotong dan dipersiapkan sesuai dengan ukuran standar pengujian ketangguhan. Dimensi spesimen uji setelah dilas adalah 150 mm × 38 mm × 10 mm. Proses pemotongan dan perapihan spesimen dilakukan secara hati-hati untuk menghindari terjadinya perubahan mikrostruktur akibat panas berlebih maupun deformasi mekanis yang dapat memengaruhi hasil pengujian.

Setelah spesimen las selesai dipersiapkan, tahap selanjutnya adalah perlakuan panas pasca-pengelasan (Post Weld Heat Treatment). Proses PWHT dilakukan dengan temperatur pemanasan konstan sebesar 590°C. Temperatur ini dipilih dengan pertimbangan berada pada rentang temperatur tempering untuk baja karbon rendah, sehingga mampu mengurangi tegangan sisa akibat pengelasan tanpa menyebabkan perubahan fasa yang ekstrem. Pada penelitian ini, variabel utama yang divariasikan adalah holding time atau waktu penahanan pada temperatur PWHT, yaitu selama 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam.

Selama proses PWHT, spesimen dipanaskan hingga mencapai temperatur 590°C dan kemudian ditahan sesuai dengan variasi holding time yang telah ditentukan. Variasi waktu penahanan ini bertujuan untuk mengamati pengaruh lamanya difusi atom dan stabilisasi mikrostruktur terhadap sifat ketangguhan material. Setelah waktu

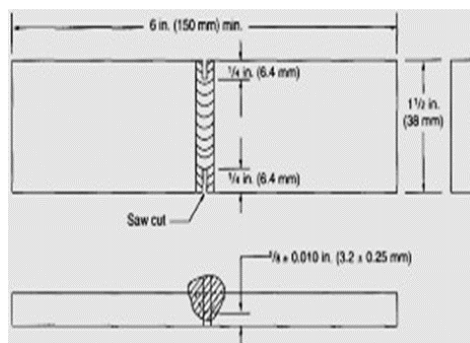
penahanan tercapai, spesimen kemudian didinginkan menggunakan media pendingin minyak kelapa. Pemilihan minyak kelapa sebagai media pendingin didasarkan pada sifatnya yang mampu memberikan laju pendinginan sedang, sehingga diharapkan dapat menghindari pendinginan terlalu cepat yang berpotensi menimbulkan tegangan sisa baru atau struktur getas, sekaligus lebih ramah lingkungan dan mudah diperoleh dibandingkan media pendingin konvensional lainnya.

Setelah proses PWHT dan pendinginan selesai, spesimen selanjutnya dipersiapkan untuk pengujian ketangguhan. Pengujian ketangguhan dilakukan menggunakan metode Charpy, yang merupakan metode standar untuk mengukur kemampuan material dalam menyerap energi sebelum mengalami patah akibat beban kejut. Metode Charpy dipilih karena mampu memberikan gambaran yang jelas mengenai perilaku material terhadap beban dinamis, khususnya pada sambungan las yang rentan terhadap retak dan kegagalan akibat impact.

Pada pengujian Charpy, spesimen diberi takik sesuai standar pengujian, kemudian ditempatkan pada mesin uji impact dan diberi beban kejut hingga spesimen patah. Energi yang diserap oleh spesimen selama proses pematahan dicatat sebagai nilai energi impact, yang selanjutnya dikonversi menjadi nilai ketangguhan dalam satuan J/mm^2 . Seluruh pengujian dilakukan dengan prosedur dan kondisi yang sama untuk setiap variasi holding time, sehingga hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara langsung dan konsisten.

Untuk memastikan validitas data, setiap variasi perlakuan dilakukan secara berulang, kemudian nilai ketangguhan yang diperoleh dirata-ratakan. Data hasil pengujian selanjutnya dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan nilai ketangguhan antar variasi holding time. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan ketangguhan akibat variasi waktu penahanan pada PWHT, serta menentukan holding time yang memberikan nilai ketangguhan optimum pada baja ST 42 hasil pengelasan SMAW.

Dengan demikian, metode penelitian ini dirancang secara sistematis dan terkontrol untuk menghasilkan data yang akurat mengenai pengaruh variasi holding time pada PWHT dengan media pendingin minyak kelapa terhadap ketangguhan baja ST 42. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan parameter perlakuan panas pasca-pengelasan yang efektif untuk meningkatkan sifat mekanik sambungan las pada baja karbon rendah.



Gambar 3. Spesimen Uji Ketangguhan



Gambar 4. Lembaran baja ST 42

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

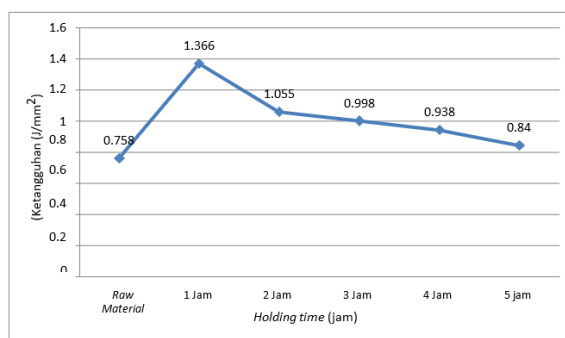
Penelitian yang dilakukan pada PWHT material baja ST 42 dengan holding time yang berbeda dan media

pendingin minyak kelapa terhadap ketangguhan baja ST 42 dimana variasi holding time yaitu 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam. Proses pengelasan menggunakan las SMAW posisi bawah tangan, arus pengelasan 120A, kampuh V dengan elektroda E6013 diameter 3,2 mm. Maka hasil penelitian diperoleh nilai ketangguhan sebagai berikut:

Tabel 1. Data hasil pengujian ketangguhan material baja ST 42 PWHT dengan variasi holding time

No	Holding Time	Ketangguhan (J/mm ²)
1	Raw Material	0.758
2	1 jam	1.366
3	2 jam	1.055
4	3 jam	0.998
5	4 jam	0.938
6	5 jam	0.840

Berdasarkan data pengujian ketangguhan seperti pada tabel 1 untuk menggambarkan pengaruh kecenderungan holding time terhadap ketangguhan material Baja ST 42 PWHT dapat diperoleh seperti grafik gambar 5 berikut:



Gambar 5. Grafik hasil pengujian ketangguhan material baja ST 42 PWHT dengan variasi holding time

Berdasarkan hasil pengujian ketangguhan yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi holding time pada proses Post Weld Heat Treatment (PWHT) dengan media pendingin minyak kelapa terhadap ketangguhan baja ST 42, diperoleh kecenderungan perubahan nilai ketangguhan yang cukup signifikan. Pengujian dilakukan pada sambungan las butt joint dengan kampuh V, menggunakan arus pengelasan sebesar 120 A dan temperatur PWHT konstan pada 590°C, dengan variasi holding time selama 1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, dan 5 jam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi holding time memberikan pengaruh nyata terhadap kemampuan material dalam menyerap energi sebelum mengalami patah.

Nilai ketangguhan pada kondisi raw material tercatat sebesar 0,758 J/mm². Nilai ini relatif lebih rendah dibandingkan dengan spesimen yang telah mengalami PWHT, khususnya pada holding time tertentu. Pada holding time 1 jam, nilai ketangguhan mengalami peningkatan yang signifikan hingga mencapai 1,366 J/mm². Peningkatan ini menunjukkan bahwa perlakuan panas pasca-pengelasan mampu memperbaiki sifat mekanik baja ST 42, terutama dalam hal ketangguhan. Peningkatan tersebut dapat dikaitkan dengan berkurangnya tegangan sisa akibat proses pengelasan serta terjadinya transformasi mikrostruktur yang lebih homogen dan stabil.

Namun, seiring dengan bertambahnya holding time, nilai ketangguhan menunjukkan tren penurunan. Pada holding time 2 jam, nilai ketangguhan menurun menjadi 1,055 J/mm², kemudian kembali menurun pada holding time 3 jam menjadi 0,998 J/mm². Penurunan ini berlanjut pada holding time 4 jam dengan nilai ketangguhan sebesar 0,938 J/mm², dan semakin menurun pada holding time 5 jam menjadi 0,840 J/mm². Pola ini menunjukkan bahwa hubungan antara holding time PWHT dan nilai ketangguhan bersifat berbanding terbalik setelah melewati kondisi optimum. Dengan kata lain, semakin lama waktu penahanan pada temperatur PWHT yang sama, maka ketangguhan material cenderung menurun. Perbandingan nilai ketangguhan tersebut secara lebih rinci disajikan pada Tabel 1 dan divisualisasikan pada Gambar 5, yang memperlihatkan dengan jelas bahwa ketangguhan tertinggi dicapai pada holding time 1 jam.

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme difusi atom dan perubahan mikrostruktur yang terjadi selama proses PWHT. Holding time yang berbeda memberikan kesempatan waktu yang berbeda pula bagi atom-atom dalam struktur logam untuk berdifusi dan mengalami transformasi fasa (Haryadi et al., 2017). Pada holding

time relatif singkat, khususnya pada rentang 45–60 menit, difusi atom berlangsung secara optimal sehingga menghasilkan mikrostruktur ferrite–pearlite yang lebih halus dan merata. Mikrostruktur yang halus ini berperan penting dalam meningkatkan ketangguhan karena mampu menahan propagasi retak serta meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi kejut.

Selain itu, pada holding time 1 jam, tegangan sisa akibat proses pengelasan berkurang secara signifikan. Tegangan sisa yang tinggi sering kali menjadi pemicu awal terjadinya retak dan kegagalan material, terutama pada struktur yang menerima beban dinamis. Dengan berkurangnya tegangan sisa, material menjadi lebih stabil dan mampu menahan beban kejut dengan lebih baik, sehingga nilai ketangguhan meningkat. Kondisi ini menjelaskan mengapa pada holding time 1 jam diperoleh nilai ketangguhan tertinggi dibandingkan variasi lainnya.

Sebaliknya, pada holding time yang terlalu lama, yaitu lebih dari 60 menit, terjadi fenomena pertumbuhan butir (grain coarsening). Pertumbuhan butir ini menyebabkan ukuran butir mikrostruktur menjadi lebih besar dan tidak lagi homogen. Menurut teori difusi yang dikemukakan oleh Fick (1855), semakin lama waktu penahanan pada temperatur tinggi, maka laju difusi atom semakin besar, sehingga mendorong terjadinya migrasi batas butir dan pembesaran ukuran butir. Struktur mikro yang kasar dan berbutir besar cenderung memiliki batas butir yang lebih lemah, sehingga kemampuan material untuk menahan deformasi plastis dan menyerap energi sebelum patah menjadi berkurang.

Akibat dari pertumbuhan butir yang berlebihan tersebut, kekuatan dan ketangguhan material menurun. Batas butir yang melemah mempermudah inisiasi dan propagasi retak, terutama ketika material menerima beban kejut. Hal inilah yang menyebabkan nilai ketangguhan pada holding time 2 jam hingga 5 jam terus mengalami penurunan secara bertahap. Meskipun nilai ketangguhan pada holding time yang lebih lama masih lebih tinggi dibandingkan raw material, namun kecenderungan penurunan ini menunjukkan bahwa holding time yang terlalu lama tidak memberikan keuntungan tambahan terhadap sifat mekanik material, bahkan justru bersifat merugikan.

Ketangguhan pada dasarnya berkaitan erat dengan kemampuan material dalam menyerap energi sebelum mengalami kegagalan atau patah. Sifat ini sangat dipengaruhi oleh kondisi mikrostruktur dan besarnya tegangan sisa di dalam material. Variasi holding time pada PWHT secara langsung memengaruhi kedua aspek tersebut, sehingga nilai ketangguhan meningkat seiring bertambahnya holding time hingga mencapai titik optimum, kemudian menurun setelah melewati titik tersebut. Dalam penelitian ini, titik optimum ketangguhan tercapai pada holding time 1 jam atau 60 menit.

Hasil ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Kavousi Sisi dan Mirsalehi (2015), yang menyatakan bahwa terdapat waktu penahanan optimum pada proses PWHT yang mampu menghasilkan keseimbangan antara penghalusan mikrostruktur dan pengurangan tegangan sisa. Apabila waktu penahanan melebihi kondisi optimum, maka efek negatif berupa pertumbuhan butir akan lebih dominan dibandingkan efek positifnya. Oleh karena itu, pemilihan holding time yang tepat menjadi faktor kunci dalam meningkatkan ketangguhan sambungan las baja ST 42. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa holding time 1 jam pada temperatur PWHT 590°C merupakan kondisi paling efektif untuk memperoleh ketangguhan maksimum pada baja ST 42 dengan media pendingin minyak kelapa.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa variasi holding time pada proses PWHT dengan media pendingin minyak kelapa pada temperatur 590°C berpengaruh signifikan terhadap nilai ketangguhan baja ST 42. Nilai ketangguhan tertinggi dicapai pada holding time 1 jam (1,366 J/mm²), sedangkan pada holding time lebih dari 1 jam, nilai ketangguhan menunjukkan tren penurunan secara bertahap. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu penahanan, terjadi pertumbuhan butir yang menyebabkan mikrostruktur menjadi lebih kasar dan homogenitas menurun, sehingga ketangguhan baja juga menurun. Dengan demikian, holding time optimum untuk memperoleh ketangguhan maksimal berada pada durasi 1 jam.

5. REFERENSI

- Ashby, M. F., & Jones, J. (2012). *Engineering Materials 1*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-64288-4>
- Bart, J. C. J., Gucciardi, E., & Cavallaro, S. (2013). *Biolubricants: Science and technology*. Woodhead publ.
- Borgnakke, C., Sonntag, R. E., Van Wylen, G. J., & Sonntag, R. E. (2009). *Fundamentals of thermodynamics* (7th ed). Wiley.
- Boumerzoug, Z., Derfouf, C., & Baudin, T. (2010). *Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties*

- of an Industrial Low Carbon Steel. *Engineering*, 02(07), 502–506. <https://doi.org/10.4236/eng.2010.27066>
- Fick, A. (1855). Ueber Diffusion. *Annalen Der Physik*, 170(1), 59–86. <https://doi.org/10.1002/andp.18551700105>
- Haryadi, G. D., Ismail, R., & Haira, M. (2017). Pengaruh Post Weld Heat Treatment (Pwht) dengan Pemanas Induksi Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Sambungan Las Shield Metal Arc Welding (Smaw) pada Pipa API 5L X52. *ROTASI*, 19(3), 117. <https://doi.org/10.14710/rotasi.19.3.117-124>
- Kavousi Sisi, A., & Mirsalehi, S. E. (2015). Effect of Post-Weld Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of X52 Linepipe HFIW Joints. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(4), 1626–1633. <https://doi.org/10.1007/s11665-015-1423-3>
- Márquez-Herrera, A., & Moreno-Palmerin, J. (2021). Corrosion resistance evaluation of boron-carbon coating on ASTM A-36 steel. *Revista Mexicana de Física*, 68(1 Jan-Feb). <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.68.011001>
- Nitha, N. (2019). Pengaruh Arus Pengelasan Terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik, Dan Struktur Mikro Hasil Las SMAW. *Mechanical Engineering Science (MES) Journal*, 1(2), 19–28.
- Nitha, N., Sangkung, J., Fikran, F., Pasae, N., Bontong, Y., & Sampelawang, P. (2024). Korelasi Media Pendingin pada Pengelasan SMAW Terhadap Kekerasan Material ST 37 Post Preheating. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(6), 9466-9474.
- Pratama, G. Y. (2022). 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. 10(03).
- Putra Nugraha, Y. D., 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. <https://doi.org/10.20961/jiptek.v10i2.16916>
- Smallman, R. E., & Bishop, R. J. (1999). *Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-4564-5.X5000-9>
- Nitha, Yafet Bontong, Petrus Sampelawang, Lantana Dioren Rumpa, Nofrianto Pasae, & Fikran. (2024). Pengaruh Temperatur Austenit dengan Holding Time 2 Jam Terhadap Kekerasan dan Ketangguhan Baja ST 42. *JOURNAL OF ELECTRICAL AND SYSTEM CONTROL ENGINEERING*, 7(2), 103–108. <https://doi.org/10.31289/jesce.v7i2.11332>
- Nitha, N., Sampelawang, P., & Ba'dung, H. S. The Effectiveness of the Effect of Holding Time on the Toughness and Macro Structure of Low Carbon Steel Due to Carburizing Pack of Pine Charcoal. *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, 21(1), 84-87.