

ANALISIS PROSES PENGELASAN *REPLATING* LAMBUNG KAPAL PADA KONDISI *FLOATING* TERHADAP NILAI KEKERASANNYA

Andri Djumiati^{1*}, Mochammad Karim Al Amin¹, Egi Yuliora², Nurul Atik Hamida¹, Puspita Khumairoh¹, Deby Ardianti¹, Sabila Fitri Afsari³

¹ Program Studi Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

² Program Studi Teknik Perkapalan, Politeknik Negeri Bengkalis

³ Program Studi Teknik Perkapalan, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta

*Corresponding author: andri.djumiati@ppns.ac.id

Article history

Received:

20-08-2025

Accepted:

03-12-2025

Published:

30-12-2025

Copyright © 2025
Jurnal Teknologi dan
Riset Terapan

Open Access

Abstrak

Replating lambung kapal merupakan proses reparasi yang penting untuk memastikan kapal tetap layak beroperasi. Pengelasan *replating* dapat dilakukan pada kondisi *docking* maupun *floating*. Perbedaan kondisi ini memengaruhi laju pendinginan (cooling rate) sehingga berpotensi menghasilkan nilai kekerasan (HV) yang berbeda. Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi jarak garis air (30, 60, 100, dan 130 mm) serta variasi temperatur air (25°C, 28°C, 30°C, dan 32°C) terhadap nilai kekerasan pengelasan kondisi *floating*.

Setiap kombinasi variasi diuji menggunakan metode Vickers sebanyak tiga kali, dan nilai HV yang disajikan merupakan nilai rata-rata. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekerasan tertinggi pada kondisi *floating* mencapai 218,5 HV (jarak 30 mm, 25°C), sedangkan nilai terendah sebesar 195,7 HV (130 mm, 32°C). Seluruh nilai kekerasan masih berada dalam batas aman BKI untuk baja karbon rendah.

Penelitian ini menunjukkan bahwa semakin dekat jarak kampuh las dengan permukaan air dan semakin rendah temperatur air, semakin tinggi nilai kekerasan akibat peningkatan laju pendinginan. Keterbatasan penelitian ini meliputi absennya data mikrostruktur dan data satuan untuk perhitungan statistik lanjutan.

Kata Kunci: *Floating, Kekerasan, Laju Pendinginan, Replating*

Abstract

Replating the ship's hull is an essential repair process to ensure that a vessel remains operationally seaworthy. Replating welding can be performed under both docking and floating conditions. These differing conditions influence the cooling rate, which in turn can result in variations in hardness (HV). This study examines the effect of varying the distance from the waterline (30, 60, 100, and 130 mm) and water temperature (25°C, 28°C, 30°C, and 32°C) on the hardness values produced during welding under floating conditions.

Each variation combination was tested using the Vickers method with three repetitions, and the reported HV values represent the average of those measurements. The results show that the highest hardness value under floating conditions reached 218.5 HV (30 mm, 25°C), while the lowest was 195.7 HV (130 mm, 32°C). All measured hardness values remained within the acceptable limits specified by BKI for low-carbon steel.

This study demonstrates that the closer the weld groove is to the water surface and the lower the water temperature, the higher the resulting hardness due to increased cooling rates. The limitations of this study include the absence of microstructural data and the unavailability of individual measurement data for further statistical analysis.

Keywords: *Floating, Hardness, Cooling Rate, Replating*

1.0 PENDAHULUAN

Replating merupakan salah satu proses reparasi penting pada struktur lambung kapal untuk menggantikan plat baja yang mengalami penurunan ketebalan, korosi, maupun kerusakan mekanis [1]. Proses ini dapat dilakukan pada kondisi *docking* maupun *floating* [2]. Pada kondisi *floating*, sebagian struktur kapal tetap terendam air sehingga proses pengelasan memiliki karakteristik termal yang berbeda dibandingkan pengelasan di darat.

Perbedaan paling signifikan antara kedua kondisi tersebut terletak pada laju pendinginan (*cooling rate*). Air memiliki kapasitas penyerapan panas yang jauh lebih besar dibandingkan udara, sehingga pengelasan yang dilakukan dekat permukaan air cenderung mengalami pendinginan lebih cepat. Laju pendinginan yang tinggi dapat memengaruhi sifat mekanik logam khususnya nilai kekerasan (*hardness*), yang sangat berkaitan dengan perubahan ukuran butir maupun fasa mikrostruktur (*ferrite–pearlite*) pada baja karbon rendah yang digunakan sebagai material lambung kapal [3].

Beberapa variabel lingkungan *floating* seperti jarak garis las terhadap garis air dan temperatur air akan sangat menentukan tingkat disipasi panas selama pengelasan. Dalam literatur, peningkatan cooling rate umumnya dapat menyebabkan struktur butir lebih halus sehingga nilai kekerasan meningkat [4]. Namun pada kisaran tertentu, pengaruh tersebut dapat menurunkan seiring jarak kampuh las semakin jauh dari media pendingin air.

Temperatur air di Indonesia berkisar antara 24–32,5°C dan dapat berubah karena cuaca, iklim, atau arus laut [5]. Oleh karena itu, pemahaman terhadap pengaruh jarak dan temperatur air terhadap nilai kekerasan hasil pengelasan *floating* sangat penting, terutama untuk memastikan pemenuhan standar Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dalam pekerjaan reparasi lambung kapal.

Penelitian ini menggunakan empat variasi jarak garis kampuh las dari permukaan air (30, 60, 100, dan 130 mm) serta empat variasi temperatur air (25, 28, 30, dan 32°C). Setiap kombinasi diuji kekerasannya menggunakan metode *Vickers* (HV) sebanyak tiga kali pengujian, dan nilai yang disajikan merupakan nilai rata-rata.

Tujuan penelitian ini adalah menentukan pengaruh jarak garis air dan temperatur air terhadap nilai kekerasan pada pengelasan *floating*, serta menentukan apakah nilai kekerasan hasil pengelasan *floating* memenuhi standar penerimaan BKI.

2.0 METODE

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode berbasis pengujian terhadap material yaitu dengan uji kekerasan.

2.1. Persiapan Eksperimen

Material yang dibutuhkan pada penelitian ini di antaranya plat BKI *grade A* dimana komposisi kimianya ditunjukkan pada Tabel 1, serta peralatan seperti elektroda, mesin las, tang ampere, *stopwatch*, perkakas, mesin frais, mesin uji kekerasan, serta bak beserta alat sirkulasi air, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Bak ini berupa material baja yang bagian sisi bawahnya diberi lubang untuk sirkulasi air.

Tabel 1: Komposisi Kimia Plat Baja BKI *Grade A*

| Komposisi Kimia | Percentase |
|-----------------|------------|
| Carbon (C) | 0,13 % |
| Silicon (Si) | 0,17 % |
| Manganese (Mn) | 0,76 % |
| Phosphorus (P) | 0,007 % |
| Sulfur (S) | 0,005 % |
| Cuprum (Cu) | 0,01 % |



Gambar 1: Bak Air Beserta *Outlet Air*

Variasi perbedaan jarak pengelasan dengan permukaan air dilakukan dengan cara mencelupkan material ke dalam air, setelah itu melakukan pengelasan dalam kondisi material tercelup pada air. Jarak garis las dengan jarak permukaan air yang digunakan adalah 30 mm, 60 mm, 100 mm, dan 130 mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2: *Setting Pengelasan Dengan Variasi Jarak 60 Mm*

Temperatur air yang digunakan dalam penelitian ini adalah 25°C, 28°C, 30°C, dan 32°C, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Untuk menjaga temperatur air tetap stabil sesuai dengan temperatur yang diharapkan maka langkah-langkahnya adalah; Mensirkulasi air dengan cara mengalirkan air yang baru ke dalam bak air dan memberikan lubang *outlet* pada bak air. Kemudian lubang *outlet* pada bak air dipasang kran agar dapat diatur banyaknya debit air yang keluar, agar variasi ketinggian garis air tetap dapat dijaga. Memasukkan es batu pada air yang digunakan untuk merendam material selama proses pengelasan. Es batu diberikan sesuai dengan kebutuhan temperatur yang ingin dijaga pada air. Memantau temperatur air secara berkala pada saat proses pengelasan menggunakan *temperature gun*.



Gambar 3: Variasi Temperatur Air

2.2. Proses Pengelasan

Proses pengelasan dilakukan menggunakan pengelasan SMAW, dengan posisi 2G, menggunakan *single bevel butt*, sesuai dengan kondisi pengelasan *replating* lambung kapal di lapangan. Setelah material yang akan dilaras sudah selesai di *setting* sesuai dengan ketinggian garis air yang divariasi, selanjutnya adalah mengatur debit air yang masuk dan keluar dari bak air. Debit air yang masuk dan keluar ini harus sama agar ketinggian air tetap konstan sesuai dengan variasi ketinggian air. Setelah itu temperatur air sebelum pengelasan diukur sesuai dengan variasi temperatur air yang digunakan pada penelitian ini. Apabila semua langkah telah selesai dilakukan, maka tahap pengelasan dapat dilakukan, proses ini ditunjukkan pada Gambar 4. Selama proses pengelasan, ketinggian air dan juga temperatur air tetap dijaga sesuai dengan variasi masing-masing.



Gambar 4: Proses Pengelasan

Berdasarkan *American Welding Society* [6], laju pendinginan pada proses pengelasan merupakan fungsi dari laju disipasi energi. Perhitungan laju pendinginan harus dilakukan pada suhu tertentu (T_c). Laju pendinginan untuk aplikasi pengelasan *single pass* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan plat tipis. Namun, hal ini tidak terlalu jelas apakah plat yang digunakan termasuk dalam kategori tebal atau tipis. Karena alasan ini, maka sebaiknya untuk menentukan apakah plat yang digunakan masuk dalam kategori plat tebal atau tipis, dapat diketahui dengan menggunakan formula ketebalan plat relatif (1) [6].

$$\tau = h \sqrt{\frac{\rho C (T_c - T_o)}{H_{net}}} \quad (1)$$

Dimana τ merupakan ketebalan plat relatif, h adalah tebal plat (cm), ρ adalah massa jenis baja (g/cm³), C adalah spesifik panas baja (kal/g °C), T_c adalah

temperatur selama laju pendinginan (°C), T_o adalah temperatur awal plat (°C), dan H_{net} adalah heat input (kal/cm).

Jika hasil dari ketebalan plat relatif adalah lebih besar dari 0,9 maka untuk menghitung laju pendinginan menggunakan formula plat tebal. Namun jika hasil ketebalan plat relatif lebih kecil dari 0,6 maka menggunakan formula plat tipis. Jika nilai dari ketebalan plat relatif antara 0,6 sampai 0,9, maka formula plat tebal digunakan untuk batas atas dan formula plat tipis digunakan untuk batas bawah.

Di bawah ini merupakan formula yang digunakan untuk menghitung laju pendinginan pada plat tipis (2), dan laju pendinginan plat tebal (3) [6].

$$R_c = -2\pi k \rho C \left(\frac{h}{H_{net}} \right)^2 (T_c - T_o)^3 \quad (2)$$

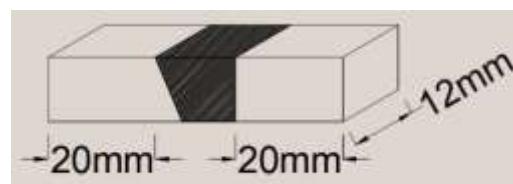
$$R_c = -\frac{2\pi k (T_c - T_o)^2}{H_{net}} \quad (3)$$

Dimana R_c adalah laju pendinginan pada logam las (°C/dtk), π sebesar 3,1416, k adalah konduktivitas termal baja (kal/cm dtk °C), ρ adalah massa jenis baja (g/cm³), C adalah spesifik panas baja (kal/g °C), h adalah tebal plat (cm), H_{net} adalah heat input (kal/cm), T_c adalah temperatur selama laju pendinginan (°C), dan T_o adalah temperatur awal plat (°C)

2.3. Benda Uji

Langkah selanjutnya adalah pembuatan benda uji. Spesimen uji kekerasan disiapkan dengan memotong kupon baja *grade A* dari pelat uji, kemudian dilakukan penggerindaan bertahap dan pemolesan hingga diperoleh permukaan yang rata, halus, bebas *scale* dan kontaminan. Prosedur preparasi permukaan diusahakan tidak menimbulkan kerusakan permukaan maupun perubahan kekerasan akibat pemanasan berlebih, sebagaimana direkomendasikan pada ISO 6507-1[7] dan ASTM E384 [8].

Sebelum pengujian, spesimen dibersihkan dari pelumas dan diklem pada dudukan yang kaku untuk mencegah perpindahan selama pembebangan, serta ketebalan spesimen dijaga minimal 1,5 kali panjang diagonal indentasi. Pada penelitian ini dimensi benda uji kekerasan diambil kurang lebih 20 mm dari kanan dan kiri *weld toe*, dengan lebar kurang lebih 12 mm, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar 6 merupakan salah satu benda uji *hardness test* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 5: Dimensi Benda Uji



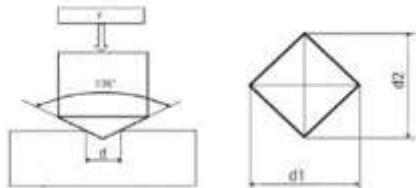
Gambar 6: Benda Uji

Setelah proses pembuatan benda uji selesai, selanjutnya dapat dilakukan proses pengujian kekerasan sesuai dengan prosedur pengujian.

2.4. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Kekuatan dan Konstruksi, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Metode pengujian kekerasan yang digunakan adalah metode *Vickers*. Metode pengujian kekerasan *Vickers* dilaksanakan dengan cara menekan benda uji atau spesimen dengan indentor intan yang berbentuk piramida dengan alas segi empat dan besar sudut dari permukaan-permukaan yang berhadapan 136° . Penekanan oleh indentor akan menghasilkan suatu jejak atau lekukan pada permukaan benda uji. Gambar 7 menunjukkan gambaran jejak akibat penekanan indentor pada benda uji.



Gambar 7: Jejak Yang Dihasilkan Oleh Penekanan Indentor Pada Benda Uji

Untuk mengetahui nilai kekerasan benda uji, maka diagonal rata-rata dari jejak tersebut harus diukur terlebih dahulu dengan memakai mikroskop. Angka kekerasan *Vickers* dapat diperoleh dengan membagi besar beban uji yang digunakan dengan luas permukaan jejak seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (4) [9].

$$HV = \frac{P}{A_p} \quad (4)$$

Jika D merupakan diagonal rata-rata dari jejak, maka luas permukaan jejak dapat ditentukan menggunakan Persamaan (5) [9].

$$A = \frac{D^2}{2 \sin 136^\circ / 2} \quad (5)$$

Jadi angka kekerasan *Vickers* dapat diperoleh dengan Persamaan (6) [9].

$$HV = 1.854 \frac{F}{D^2} \quad (6)$$

Dimana HV adalah *vickers hardness*, P adalah beban yang diberikan (kgf), A_p adalah beban yang diberikan

(kgf), A adalah luas penampang (m^2), D adalah diagonal rata-rata jejak penetrasi (mm), dan F adalah gaya (N).

Berdasarkan Biro Klasifikasi Indonesia [10] yang menunjukkan peraturan mengenai nilai kekerasan yang diizinkan untuk pengelasan struktur lambung kapal, menjelaskan bahwa uji kekerasan dapat dilakukan pada material dengan *yield strength* lebih dari atau sama dengan 355 N/mm^2 . Hasil dari pengujian kekerasan tidak boleh lebih dari 350 HV10 untuk kasus baja dengan kekuatan tinggi, baja cor, dan material yang ditempa dengan nilai minimum *yield strength* kurang dari atau sama dengan 400 N/mm^2 . Untuk material dengan kadar karbon tinggi atau *higher strength steel*, nilai kekerasan yang diizinkan adalah di bawah 350 HV karena material dengan karbon tinggi lebih rentan untuk terjadi *martensit* pada pendinginan cepat. Lain halnya pada material dengan kadar karbon rendah atau masuk dalam kategori baja lunak, dimana tidak ada peraturan khusus mengenai nilai kekerasan yang diizinkan karena material dengan kadar karbon yang rendah memiliki risiko yang kecil untuk menjadi *martensit* pada pendinginan cepat jika dibandingkan dengan material dengan kadar karbon tinggi.

Untuk setiap kombinasi jarak dan temperatur, dilakukan tiga kali indentasi pada empat lokasi yaitu *base metal*, *HAZ*, *fusion line*, dan *weld metal*, menggunakan beban 10 kgf dan hasilnya dirata-ratakan, sebagaimana disarankan oleh ASTM E384 [8] bahwa beberapa indentasi diperlukan untuk memperoleh estimasi kekerasan yang representatif.

3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

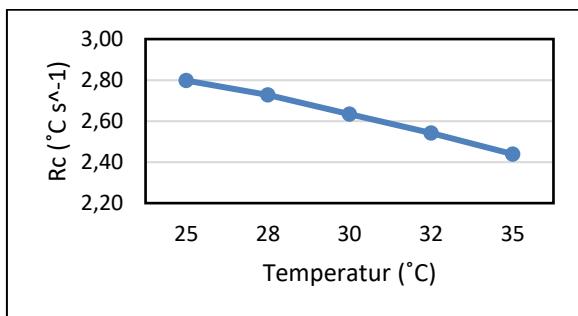
3.1. Analisis Laju Pendinginan

Hasil perhitungan ketebalan pelat relatif (τ) pada keseluruhan percobaan yang dilakukan adalah kurang dari 0,6, maka untuk menghitung laju pendinginan menggunakan persamaan (2) untuk kategori pelat tipis. Tabel 2 menjelaskan hasil perhitungan laju pendinginan (R_c), dan Gambar 8 menunjukkan grafik laju pendinginan.

Hasil perhitungan laju pendinginan dari semua variasi menunjukkan nilai laju pendinginan tertinggi adalah pada suhu 25°C , hal ini sesuai dengan literatur bahwa suhu yang lebih rendah memiliki laju pendinginan lebih tinggi dibandingkan dengan suhu yang lebih tinggi [11]. Berdasarkan perhitungan laju pendinginan, maka pengelasan yang telah dilakukan pada keseluruhan variasi dapat digunakan dan dibandingkan nilai kekerasannya antara satu dengan lainnya.

Tabel 2: Laju Pendinginan Pada Temperatur Air Yang Berbeda

| Temperatur Air (°C) | Rc (°C/s) |
|-----------------------------|-----------|
| 25 | 2.80 |
| 28 | 2.73 |
| 30 | 2.63 |
| 32 | 2.54 |
| 35 (Pengelasan di darat) | 2.44 |

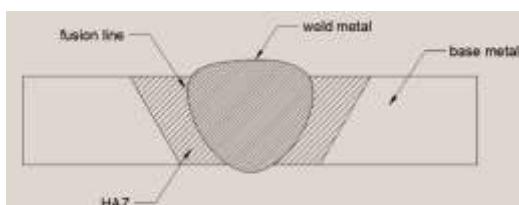


Gambar 8: Grafik Laju Pendinginan

3.2. Lokasi Indentasi

Pengujian kekerasan pada penelitian ini diambil pada empat lokasi yaitu *base metal*, *HAZ*, *fusion line*, dan *weld metal*. Adapun penjelasan lokasi dapat dilihat pada Gambar 9. Masing-masing lokasi menggunakan beban sebesar 10 kgf dengan *dwell time* 15 detik. Setiap kombinasi variasi jarak dan temperatur diuji kekerasannya sebanyak tiga kali pada lokasi yang sama untuk meningkatkan reliabilitas pembacaan [8].

Selanjutnya ketiga hasil tersebut dihitung nilai rata-ratanya untuk digunakan sebagai acuan hasil yang nilainya ditampilkan dalam penelitian ini. Penyajian nilai rata-rata HV masih relevan dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi tren perubahan kekerasan antar variasi, terutama karena perbedaan nilai HV yang muncul pada penelitian ini bersifat konsisten dan menunjukkan pola yang sejalan dengan teori laju pendinginan [4].



Gambar 9: Lokasi Indentasi Pada Pengujian Kekerasan

3.3. Pengelasan Di Darat

Nilai kekerasan pada pengelasan darat di lokasi *base metal*, *HAZ*, *fusion line* dan *weld metal* masing-masing adalah adalah sebesar 153,4 HV, 158,7 HV, 160,2 HV, 165,7 HV, dan grafiknya ditunjukkan pada Gambar 10. Hasil pengujian kekerasan pada pengelasan darat menunjukkan nilai kekerasan memenuhi kriteria dari peraturan Biro Klasifikasi Indonesia [10], dimana nilai kekerasan yang diizinkan untuk pengelasan baja pada struktur lambung kapal telah dijelaskan pada Sub Bab 2.6.



Gambar 10: Grafik Kekerasan Pengelasan Di Darat

Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan nilai kekerasan dari daerah *base metal*, *HAZ*, *fusion line*, dan *weld metal*. Peningkatan nilai kekerasan ini dikarenakan struktur pada daerah *weld metal* lebih keras jika dibandingkan daerah lainnya, karena pada daerah *weld metal* terjadi proses peleburan antara *base metal* dengan elektroda yang digunakan, dimana elektroda yang digunakan memiliki nilai kuat tarik minimum yang lebih besar dibandingkan dengan kuat tarik minimum pada *base metal*, oleh karena itu pada daerah *weld metal* terjadi transformasi pendinginan dari temperatur yang tinggi akibat pencairan antara *base metal* dengan elektroda.

3.4. Pengelasan Di Atas Permukaan Air (Terapung)

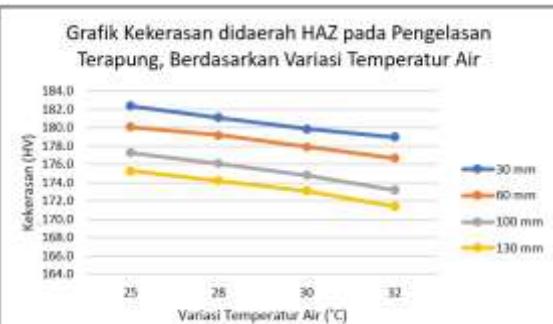
Karakteristik nilai kekerasan pada pengelasan di atas permukaan air pada daerah *HAZ*, *fusion line*, dan *weld metal* ditabulasi pada Tabel 3 sampai dengan Tabel 5 dan grafiknya digambarkan pada Gambar 11 sampai dengan Gambar 16.

Tabel 3: Hasil Pengujian Kekerasan Di Daerah HAZ

| Nilai Kekerasan di Daerah HAZ (HV) | | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Variasi Jarak (mm) | 25°C | 28°C | 30°C | 32°C |
| 30 | 182,4 | 181,1 | 179,9 | 179,0 |
| 60 | 180,1 | 179,1 | 177,9 | 176,7 |
| 100 | 177,3 | 176,1 | 174,8 | 173,2 |
| 130 | 175,3 | 174,2 | 173,1 | 171,4 |



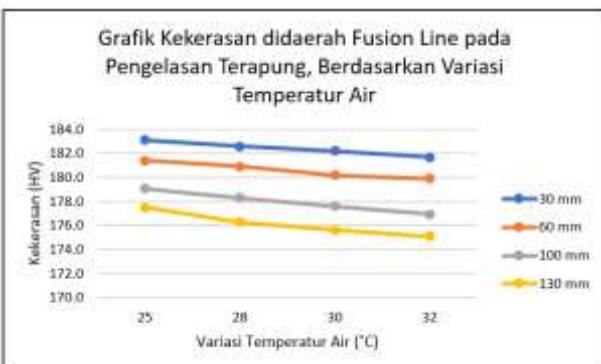
Gambar 11: Grafik Kekerasan Di Daerah HAZ Pada Pengelasan Di Atas Permukaan Air Berdasarkan Variasi Jarak



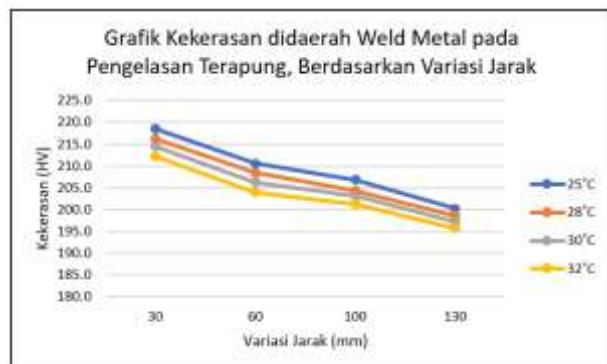
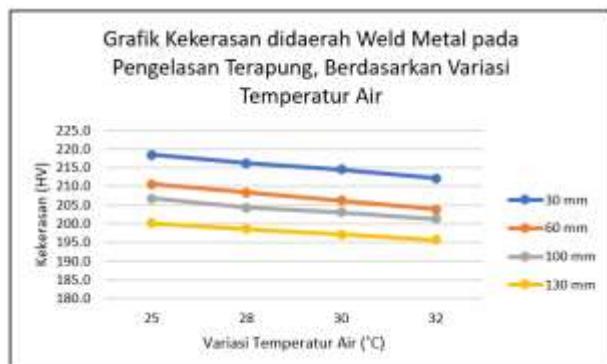
Gambar 12: Grafik Kekerasan Di Daerah HAZ Pada Pengelasan Di Atas Permukaan Air Berdasarkan Variasi Temperatur Air

Tabel 4: Hasil Pengujian Kekerasan Di Daerah *Fusion Line*

| Nilai Kekerasan di Daerah <i>Fusion Line</i> (HV) | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Variasi Jarak (mm) | 25°C | 28°C | 30°C | 32°C |
| 30 | 183,1 | 182,6 | 182,2 | 181,7 |
| 60 | 181,4 | 180,9 | 180,2 | 179,9 |
| 100 | 179,1 | 178,3 | 177,6 | 176,9 |
| 130 | 177,5 | 176,3 | 175,6 | 175,1 |

Gambar 13: Grafik Kekerasan Di Daerah *Fusion Line* Pada Pengelasan Di Atas Permukaan Air Berdasarkan Variasi JarakGambar 14: Grafik Kekerasan Di Daerah *Fusion Line* Pada Pengelasan Di Atas Permukaan Air Berdasarkan Variasi Temperatur AirTabel 5: Hasil Pengujian Kekerasan Di Daerah *Weld Metal*

| Nilai Kekerasan di Daerah <i>Weld Metal</i> (HV) | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Variasi Jarak (mm) | 25°C | 28°C | 30°C | 32°C |
| 30 | 218,5 | 216,2 | 214,5 | 212,2 |
| 60 | 208,9 | 207,7 | 206,2 | 205,8 |
| 100 | 206,8 | 205,2 | 203,1 | 201,3 |
| 130 | 200,3 | 198,6 | 197,1 | 195,7 |

Gambar 15: Grafik Kekerasan Di Daerah *Weld Metal* Pada Pengelasan Di Atas Permukaan Air Berdasarkan Variasi JarakGambar 16: Grafik Kekerasan Di Daerah *Weld Metal* Pada Pengelasan Di Atas Permukaan Air Berdasarkan Variasi Temperatur Air

Berdasarkan Gambar 11, Gambar 13, dan Gambar 15 yang merupakan grafik hasil pengujian kekerasan terhadap variasi jarak dapat dilihat bahwa pada daerah HAZ, *fusion line*, dan *weld metal* terjadi penurunan nilai kekerasan seiring dengan semakin besar jarak garis air dan garis kampuh las, hal ini dikarenakan kapasitas air sebagai media pendinginan semakin kecil, sehingga laju pendinginan semakin rendah [12]. Hasil tersebut sesuai dengan literatur bahwa nilai kekerasan pada material yang telah mengalami perlakuan panas lalu didinginkan dengan lambat memiliki nilai kekerasan yang lebih kecil dibandingkan dengan material dengan pendinginan cepat (jarak garis air dan garis kampuh las lebih kecil) [4].

Grafik hasil pengujian kekerasan terhadap variasi temperatur air (Gambar 12, Gambar 14, dan Gambar 16) juga menunjukkan bahwa terjadi penurunan nilai kekerasan pada setiap kenaikan temperatur air, meskipun nilainya tidak signifikan. Hal ini dikarenakan temperatur air yang semakin rendah menunjukkan laju pendinginan yang semakin cepat, sehingga pengelasan di atas permukaan air dengan temperatur air yang rendah akan menghasilkan material yang lebih keras jika dibandingkan dengan material yang dilas di atas permukaan air dengan temperatur air yang lebih tinggi (pendinginan lambat) [4].

3.5. Perbandingan Hasil

Berdasarkan Tabel 5 yang menunjukkan nilai kekerasan pengelasan di atas permukaan air di daerah *weld metal*, dan juga berdasarkan nilai kekerasan pengelasan darat di daerah *weld metal* yaitu sebesar 165,70 HV, dapat

digambarkan grafik nilai kekerasan seluruh variasi. Gambar 17 menunjukkan grafik nilai kekerasan pada seluruh variasi di penelitian ini, baik pada pengelasan di atas permukaan air maupun pengelasan di darat. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar jarak antara garis air dengan garis kampuh las dan semakin tinggi temperatur air, akan membuat nilai kekerasan material semakin rendah dan mendekati dengan nilai kekerasan pada pengelasan di darat.



Gambar 17: Grafik Nilai Kekerasan Pengelasan Di Atas Permukaan Air Dan Pengelasan Darat Di Daerah Weld Metal

Tabel 6 menunjukkan persentase perbandingan nilai kekerasan pada pengelasan di atas permukaan air dengan nilai kekerasan pada pengelasan di darat di daerah *weld metal*. Dimana nilai kekerasan pengelasan darat di daerah *weld metal* adalah sebesar 165,7 HV.

Tabel 6: Persentase Peningkatan Nilai Kekerasan Pada Weld Metal

| Persentase Peningkatan Nilai Kekerasan (%) | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|
| Variasi Jarak (mm) | 25°C | 28°C | 30°C | 32°C |
| 30 | 31.86 | 30.48 | 29.45 | 28.06 |
| 60 | 27.10 | 25.77 | 24.46 | 23.05 |
| 100 | 24.82 | 23.30 | 22.55 | 21.48 |
| 130 | 20.82 | 19.86 | 18.95 | 18.11 |

Dari Tabel 6 dapat diketahui bahwa peningkatan nilai kekerasan pada pengelasan di atas permukaan air terhadap pengelasan darat cukup signifikan yaitu antara 18% sampai 32%. Persentase peningkatan nilai kekerasan yang paling besar adalah pada variasi jarak garis air dan garis kampuh las sebesar 30 mm dengan temperatur air 25°C, dengan persentase sebesar 31,86 %, sedangkan persentase peningkatan nilai kekerasan yang paling kecil adalah pada variasi jarak garis air dan garis kampuh las sebesar 130 mm dengan temperatur air 32°C, yaitu dengan persentase sebesar 18,11%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa berdasarkan nilai kekerasannya, pengelasan di atas permukaan air yang paling optimal untuk diaplikasikan berdasarkan penelitian ini adalah pada variasi jarak garis air dan garis kampuh las 130 mm dengan temperatur air 32°C.

Berdasarkan hasil penelitian ini, pengelasan replating pada kondisi *floating* dapat dilaksanakan secara aman selama jarak antara garis air dan garis kampuh las dijaga minimal 30 mm agar laju pendinginan tidak

menghasilkan kenaikan kekerasan yang berlebihan. Untuk memperoleh karakteristik kekerasan yang lebih mendekati kondisi pengelasan di darat, jarak yang lebih besar, khususnya mendekati 100 hingga 130 mm, lebih direkomendasikan karena memberikan nilai kekerasan yang lebih stabil dan rendah. Temperatur air dalam kisaran 25°C hingga 32°C tetap dapat digunakan dalam pekerjaan lapangan, tetapi temperatur yang lebih tinggi cenderung memberikan hasil yang lebih mendekati sifat mekanik pengelasan di darat. Seluruh nilai kekerasan yang diperoleh tetap berada di bawah batas maksimum 350 HV sebagaimana disyaratkan oleh Biro Klasifikasi Indonesia [10] untuk material baja karbon rendah, sehingga argumen ilmiah bahwa pengelasan *floating* aman untuk diaplikasikan pada rentang kondisi yang diuji.

4.0 KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi jarak antara garis air dengan garis kampuh las serta variasi temperatur air berpengaruh terhadap nilai kekerasan hasil pengelasan *replating* pada kondisi *floating*. Nilai kekerasan cenderung menurun seiring bertambahnya jarak kampuh las dari permukaan air dan meningkatnya temperatur air, yang berkaitan dengan penurunan laju pendinginan pada kedua kondisi tersebut. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa nilai kekerasan tertinggi mencapai 218,5 HV pada jarak 30 mm dengan temperatur air 25°C, sedangkan nilai terendah sebesar 195,7 HV diperoleh pada jarak 130 mm dengan temperatur air 32°C. Seluruh nilai kekerasan yang diperoleh berada dalam batas penerimaan BKI untuk baja *grade A* sehingga dapat disimpulkan bahwa pengelasan pada kondisi *floating* masih dapat diaplikasikan dengan aman dalam rentang variasi yang diuji. Penelitian ini juga menegaskan bahwa jarak minimal 30 mm dari permukaan air dapat digunakan sebagai acuan praktis untuk pekerjaan *replating* di lapangan, meskipun jarak yang lebih besar menghasilkan karakteristik kekerasan yang lebih mendekati pengelasan di darat. Keterbatasan penelitian berupa tidak tersedianya data satuan hasil uji untuk analisis statistik lanjutan serta tidak dilakukannya pengamatan mikrostruktur, sehingga disarankan agar penelitian berikutnya menyertakan analisis statistika dan karakterisasi mikrostruktur untuk memperkuat dasar ilmiah temuan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. R. Mandal, *Ship Construction and Welding*, vol. 2. in Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, vol. 2. Singapore: Springer Singapore, 2017. doi: 10.1007/978-981-10-2955-4.
- [2] A. Djumiati, A. Zubaydi, W. H. Akbar Putra, and A. Ismail, "The effect of ship replating welding process on floating conditions against strength value," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1034, no. 1, p. 012098, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1034/1/012098.
- [3] X. Di, S. Ji, F. Cheng, D. Wang, and J. Cao, "Effect of cooling rate on microstructure, inclusions and mechanical properties of weld metal in simulated

- local dry underwater welding," *Mater. Des.*, vol. 88, pp. 505–513, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.025.
- [4] M.-X. Sun, W.-N. Zhang, Z.-Y. Liu, and G.-D. Wang, "Effect of cooling mode on microstructure and mechanical properties in an extremely low carbon Cu bearing steel," *Mater. Charact.*, vol. 120, pp. 38–44, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.matchar.2016.08.018.
- [5] B. Sukresno, D. Jatisworo, and R. Hanintyo, "Validation of Sea Surface Temperature from GCOM-C Satellite Using iQuam Datasets and MUR-SST in Indonesian Waters," *Indones. J. Geogr.*, vol. 53, no. 1, Apr. 2021, doi: 10.22146/ijg.53790.
- [6] K. Sinnes, Ed., *Welding handbook. Volume 1, Welding and cutting science and technology*, Tenth edition. Miami, FL: American Welding Society, 2018.
- [7] "ISO-6507-1-2023."
- [8] "ASTM E 384."
- [9] D. F. R. Bethony, "METALURGI FISIK (PHYSICAL METALLURGY)," *Phys. Metall.*
- [10] "(Vol VI),2019 Rules for Welding,2019."
- [11] G. Turichin, M. Kuznetsov, A. Pozdnyakov, S. Gook, A. Gumennyuk, and M. Rethmeier, "Influence of heat input and preheating on the cooling rate, microstructure and mechanical properties at the hybrid laser-arc welding of API 5L X80 steel," *Procedia CIRP*, vol. 74, pp. 748–751, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.08.018.
- [12] B. P. Nagasai, S. Malarvizhi, and V. Balasubramanian, "Effect of welding processes on mechanical and metallurgical characteristics of carbon steel cylindrical components made by wire arc additive manufacturing (WAAM) technique," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 36, pp. 100–116, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.cirpj.2021.11.005.
- [13] D. Butler, *A guide to ship repair estimates in man hours*, 2nd edition. in Marine engineering. Amsterdam [Netherlands]: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2012.
- [14] "ASME 2017 SEC II Part A."
- [15] "ASTM A370 - 19."
- [16] "AWS D1.1-D1.1M-2015."
- [17] M. P. Garcia, A. Gervasyev, C. Lu, and F. J. Barbaro, "Chemical composition and weld cooling time effects on heat-affected zone hardness of line pipe steels," *Int. J. Press. Vessels Pip.*, vol. 200, p. 104837, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.ijpvp.2022.104837.
- [18] C.-G. Jeong, T. T. T. Trang, Y. Woo, E. Y. Yoon, Y. Lee, and Y.-U. Heo, "Effect of cooling rate on the final microstructure and tensile property in an Fe–Mn–Si–C-based multiphase TRIP steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 887, p. 145696, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.msea.2023.145696.
- [19] T. Han, C.-H. Kuo, N. Sridharan, L. M. Headings, S. S. Babu, and M. J. Dapino, "Effect of weld power and interfacial temperature on mechanical strength and microstructure of carbon steel 4130 fabricated by ultrasonic additive manufacturing," *Manuf. Lett.*, vol. 25, pp. 64–69, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.mfglet.2020.07.006.
- [20] D. Pathak, R. P. Singh, S. Gaur, and V. Balu, "Experimental investigation of effects of welding current and electrode angle on tensile strength of shielded metal arc welded low carbon steel plates," *Mater. Today Proc.*, vol. 26, pp. 929–931, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.146.
- [21] J. Zhang, K. Cui, B. Huang, X. Mao, and M. Zheng, "Influence of heat input on the microstructure and mechanical properties of CLAM steel multilayer butt-welded joints," *Fusion Eng. Des.*, vol. 152, p. 111413, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.fusengdes.2019.111413.
- [22] L. D. J. Jorge *et al.*, "Mechanical properties and microstructure of SMAW welded and thermically treated HSLA-80 steel," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 598–605, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jmrt.2018.08.007.
- [23] A. Rezaeian, M. Keshavarz, and E. Hajjari, "Mechanical properties of steel welds at elevated temperatures," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 167, p. 105853, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105853.
- [24] P. D. Gosavi, K. K. Sarkar, S. K. Khunte, V. R. Pawar, and B. Basu, "Microstructure and mechanical properties correlation of weld joints of a high strength naval grade steel," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 14, pp. 304–313, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2019.05.038.
- [25] C. Borchers *et al.*, "Microstructure and mechanical properties of medium-carbon steel bonded on low-carbon steel by explosive welding," *Mater. Des.*, vol. 89, pp. 369–376, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.matdes.2015.09.164.
- [26] Y. Hu, Y. Shi, K. Sun, and X. Shen, "Microstructure evolution and mechanical performance of underwater local dry welded DSS metals at various simulated water depths," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 264, pp. 366–376, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.09.023.
- [27] N. Subeki, A. I. Fanani, and D. Kurniawati, "PENGARUH PENAMBAHAN STATIC COOLING DENGAN VARIASI KAPASITAS AIR TERHADAP DISTORSI DAN SIFAT MEKANIK PADA PENGELASAN FCAW," 2018.