

Analisis *Multiple Repair* dan *Holding Time Post Weld Heat Treatment* Material SA 335 Grade P91 dengan Proses Pengelasan SMAW Terhadap Nilai Kekerasan dan Metalografi

Herlanda Mauludina Yahya^{1*}, Moh. Syaiful Amri², Bachtiar³

Program Studi Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya 60111^{1}*

Email: herlanda252@gmail.com¹

Abstract – *Multiple repair processes are frequently employed in the welding industry. Increasing the frequency of repairs alters the material's microstructure and enhances its hardness. SA 335 Grade P91 materials require heat treatments, such as post-weld heat treatment, to restore their mechanical properties after welding and repair processes. This research evaluated the influence of varying the number of repairs (no repair, 2 repairs, and 3 repairs) and PWHT holding time (30 minutes and 60 minutes) on weld metallography and hardness. Metallographic analysis revealed that the Heat Affected Zone (HAZ) expands with an increasing number of repairs, with the maximum HAZ area recorded in the 3-repair specimen (211.58 mm²). The proportion of pearlite and martensite phases increases with the number of repairs, leading to an increase in hardness. However, grain growth due to prolonged holding time during PWHT tends to decrease hardness. Hardness testing results demonstrate an increase in hardness with an increasing number of repairs, especially in the weld metal. The highest hardness was observed in the 3-repair specimen with a 30-minute holding time (343.16 HVN), while the lowest hardness was found in the non-repair specimen with a 60-minute holding time (316.77 HVN). Specimens with the same numbers of repairs but a longer holding time (3-repair, 60-minute holding time) exhibited a hardness of 330.87 HVN, indicating that a longer holding time tends to decrease hardness*

Keyword: *Multiple repair processes, Post-weld heat treatment holding time, hardness testing, Metallographic examination, SA335 Grade*

1. PENDAHULUAN

Proses pengelasan, yang melibatkan pemanasan material hingga titik leleh, dapat mengakibatkan perubahan mikrostruktur signifikan, termasuk pertumbuhan butir pada daerah yang terpengaruh panas (HAZ). Perubahan mikrostruktur ini berpotensi menurunkan kekuatan mekanik material. Cacat las seperti pori-pori, inklusi slag, dan undercut adalah hal yang umum terjadi dan memerlukan perbaikan. Proses perbaikan melibatkan penghapusan lasan yang cacat dan pengelasan ulang. Namun, perbaikan berulang dapat memperparah pertumbuhan butir, terutama pada material dengan ketebalan sedang, dan meningkatkan kekerasan. Meskipun praktik umum membatasi perbaikan hanya dua kali, standar atau kode terkait seringkali tidak secara eksplisit mengatur batasan ini. Jika cacat masih terjadi setelah perbaikan kedua, sambungan las harus dipotong dan disambung ulang

Fabrikasi power plan memerlukan material yang memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi dan ketahanan terhadap korosi uap suhu tinggi, Salah satunya adalah material *Alloy Steel SA 335 grade P91*. *Grade 91* adalah baja jenis *ferritic* dan juga *martensitic* dengan kandungan 9%

Chromium 1% molybdenum dengan sedikit ditambah vanadium dan columbium yang berguna mengontrol [1]. Material ini memiliki sifat yang sensitif terhadap perubahan struktur mikro oleh karena itu masukan panas sangat diperharikan.

Pada material *grade P91* setelah dilakukan proses pengelasan perlu dilakukan perlakuan khusus. Setelah dilakukan pengelasan material mengalami perubahan kekuatan dan menimbulkan adanya tegangan sisa, untuk itu perlu dilakukan *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* yang bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa dan menurunkan nilai kekerasan [2]. Salah satu faktor krusial yang harus diperhatikan pada proses PWHT adalah *holding time*. Lamanya waktu *holding time* mengakibatkan nilai kekerasan akan menurun, kenaikan waktu *holding time* akan menyebabkan kekerasan mikro pada HAZ dan *weld metal* menurun [3]. Dari penelitian ini diharapkan akan didapatkan informasi mengenai nilai kekerasan dari sambungan las pada material SA-335 grade P91 akibat *multiple repair* welding dan perbedaan waktu *holding time*. Sehingga dari penelitian ini nantinya dapat diketahui batas perlakuan *repair* yang masih di izinkan

2. METODOLOGI

Dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan mulai dari persiapan alat dan bahan, *preheat* material, proses pengelasan, proses *repair*, *visual test*, pengujian radiografi, *Post Weld Heat Treatment*, pengujian metalografi dan kekerasan, analisis data dan pembahasan serta Kesimpulan dan saran.

2.1 Persiapan Alat dan Bahan

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah material SA-335 grade P91 dengan diameter 114,3mm dan ketebalan 17.12mm proses pengelasan yang digunakan berupa *shield metal arc welding* (SMAW). fokus penelitian ini pada banyaknya proses *repair* dan lamanya *holding time Post Weld Heat Treatment*. Pada setiap specimen, notasi yang diberikan sebagai berikut :

Tabel 1: Notasi Penamaan Spesimen

Notasi Spesimen	Keterangan
RA 1	Spesimen non-repair holding time 30 menit
RA 2	Spesimen repair 2x holding time 30 menit
RA 3	Spesimen repair 3x holding time 30 menit
RB 1	Spesimen non-repair holding time 60 menit
RB 2	Spesimen repair 2x holding time 60 menit
Rb 3	Spesimen repair 3x holding time 60 menit

Berdasarkan ASME sec. II Part A1 [4] Mechanical properties dan komposisi kimia material A-335 grade Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2: Mechanical Properties Material SA 335 Grade P91

Material	Minimum Yield Strength Ksi (MPa)	Minimum Tensile Strength Ksi (MPa)
A 335 Grade P91	60 (415)	85 (585)

Tabel 3: Chemical Composition Material SA 335 Grade P91

Chemical Composition (%) (UNS No. K91560)			
C	0.08 -0.12	Si	0.2- 0.4
Mn	0.3 - 0.5	Cr	8 - 9.5
P	0.02	Mo	0.85 -1.05
S	0.005	V	0.18 -0.25

Filler metal yang digunakan yaitu E9015-B9 dengan diameter 3,2 mm, berdasarkan ASME sec. II Part C [5] *mechanical properties* dan komposisi kimia *filler metal* dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 6

Tabel 4: Mechanical Properties Filler Metal E9015 - B9

Material	Minimum Yield Strength Ksi (MPa)	Minimum Tensile Strength Ksi (MPa)	Elongation (%)
A 335 Grade P91	60 (415)	85 (585)	19%

Tabel 5: Chemical Composition Filler Metal E9015 - B9

Chemical Composition (%) (E 9015 B9)			
C	0.1	Si	0.17
Mn	0.8	Cr	88.5
P	0.008	Mo	1
S	0.009	V	0.19
N	0.2	Cu	0.04

Alat lain yang digunakan untuk menunjang kelancaran penelitian ini antara lain mesin las *shield metal arc welding* (SMAW) yang digunakan untuk proses pengelasan spesimen. *Chipping hammer* yang digunakan untuk membersihkan *slag* atau terak las dan gerinda untuk membersihkan spesimen. *Blander oxy acetyline* yang digunakan untuk memberikan perlakuan panas sebelum dilakukan proses pengelasan atau disebut juga *preheat*. *Thermogun* untuk memastikan temperatur *preheat* sesuai dengan ketentuan pada penelitian ini. Lalu *welding gauge* digunakan untuk memastikan *capping reinforcement* sesuai dengan syarat keberterimaan

2.2 Proses Preheat dan Pengelasan

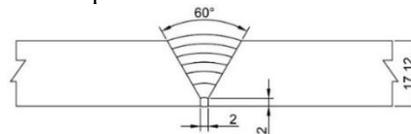
sebelum dilakukan *preheat* dan pengelasan material akan dilakukan *fit-up* sesuai dengan joint design yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Fit-up Material

Setelah proses *fit-up* akan dilakukan *preheat*, pada penelitian ini metode *preheat* menggunakan *blander oxy acetyline*. Pada material P91 *preheat* merupakan mandatory atau wajib dilakukan pemanasan awal, mengacu pada standar ASME B31.1 2022 [6] material dengan P-No 15E tanpa pengecualian wajib dilakukan proses perlakuan panas atau *preheat* sebelum dilakukannya proses pengelasan. Temperatur *preheat* pada material P91 menurut ASME B31.3 sebesar 205°C.

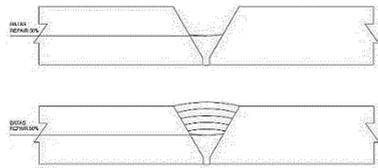
Setelah dilakukan proses *preheat* dengan temperatur yang ditentukan. Tahap selanjutnya adalah proses pengelasan, proses pengelasan yang digunakan pada penelitian ini adalah SMAW dengan posisi 1G dan *filler metal* yang digunakan adalah E9015-B9. *Joint design* sambungan las dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Joint Design

2.3 Proses Repair

Tahapan *repair* digunakan untuk menghilangkan hasil las yang terdapat cacat sebelum dilakukan pengelasan ulang. Pada prosesnya penghilangan hasil las menggunakan gerinda tangan lalu akan dilakukan proses pengelasan kembali. *Design repair* yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut



Gambar 3. Desain *Repair*

Variasi jumlah *repair* yang digunakan sebagai berikut :

- *Non-repair* : RA 1 dan RB 1
- *Repair* 2 kali : RA 2 dan RB 2
- *Repair* 3 kali : RA 3 dan RB 3

Proses *repair* dan pengelasan pada setiap variasi menggunakan metode yang sama.

2.4 Visual Test

Uji visual pada prinsipnya adalah pengujian yang menggunakan cahaya yang dipantulkan atau ditransmisikan dari objek yang diamati kemudian ditangkap oleh mata manusia atau alat bantu pengindera cahaya lainnya. Pengujian visual dilakukan untuk membuktikan bahwa hasil pengelasan pada penelitian ini tidak terdapat cacat pada *area surface* pengelasan.

2.5 Radiography Test

Pada penelitian kali ini pengujian radiografi menggunakan teknik *Double Wall Exposure Single Viewing* (DWSV). Pengujian radiografi digunakan untuk membuktikan tidak adanya cacat di dalam hasil pengelasan serta sebagai pendukung hasil *visual test*.

2.6 Post Weld Heat Treatment (PWHT)

Post Weld Heat Treatment adalah perlakuan panas yang di berikan setelah dilakukan proses pengelasan. Penerapan PWHT bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa setelah dilakukan pengelasan. oleh karena itu PWHT pada suhu AC1 dengan holding time tertentu diperlukan untuk memperbaiki struktur mikro. PWHT dibawah suhu AC1 selama periode tertentu diperlukan. pada (ASME B31.1, 2022) [7] bahwa material dengan P-No 15E tidak ada pengecualian thickness untuk proses *Post Weld Heat Treatment*.

PWHT pada material *alloy steel* pada *temperature heating* 425°C harus dicatat, pada saat temperatur berada di atas 425°C laju pemanasan tidak boleh melebihi 222°C dibagi ketebalan material. *Cooling rate* pada temperature di atas 425°C laju pendinginan tidak boleh

melebihi 280°C dibagi ketebalan material, saat temperatur berada di atas 425°C pendinginan dilakukan secara perlahan di dalam *furnace* dan saat temperatur 425°C material dapat dikeluarkan dan didinginkan di udara bebas sampai temperature kamar Pada penelitian ini, digunakan PWHT dilakukan pada temperatur 750°C dengan menggunakan variasi *holding time* yaitu sebagai berikut :

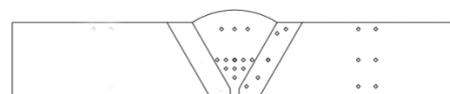
- *Holding time* 30 menit pada spesimen RA 1, RA 2, dan RA 3
- *Holding time* 60 menit pada spesimen RB 1, RB 2, dan RB 3

2.7 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi digunakan untuk melihat hasil pengelasan pada daerah *weld metal*, HAZ dan *base metal*, pengujian metalografi terdiri dari pengujian *micro examination* dan *macro examination* [8]. Pada penelitian ini pengujian metalografi digunakan untuk mengetahui pengaruh dari banyaknya proses *repair* yang diberikan dan lamanya *holding time* PWHT yang diterima pada setiap spesimen pada material SA 335 grade P91. Sebelum dilakukan proses pengujian, material terlebih dahulu dilakukan proses *grinding* dan *polishing* untuk menghaluskan material, jika permukaan material sudah cukup halus kemudian material akan diberikan proses *etching* menggunakan larutan *Nital* (campuran 98 ml HNO_3 dan 2 ml alkohol). Pengujian mikro dilakukan menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 500X pengambilan gambar dilakukan pada daerah *base metal*, *Heat Affected Zone* (HAZ) dan *weld metal* dan untuk pengujian makro menggunakan kamera makro.

2.8 Pengujian Hardness Vickers

Pengujian *hardness vickers* dilakukan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material di daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal*. Pada penelitian ini, pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh banyaknya proses *repair* dan lamanya *holding time* PWHT pada material SA 335 grade P91. *Hardness test* dilakukan dengan menggunakan metode *hardness vickers* (HVN) menggunakan pembebanan 2Kgf dengan waktu pembebanan 10 detik. Jumlah titik yang dilakukan uji *hardness* pada masing-masing variasi berjumlah 29 titik yaitu 6 titik pada area *base metal*, 5 titik pada daerah HAZ dan 18 titik pada *weld metal*. Lokasi indentasi dapat dilihat pada Gambar 4



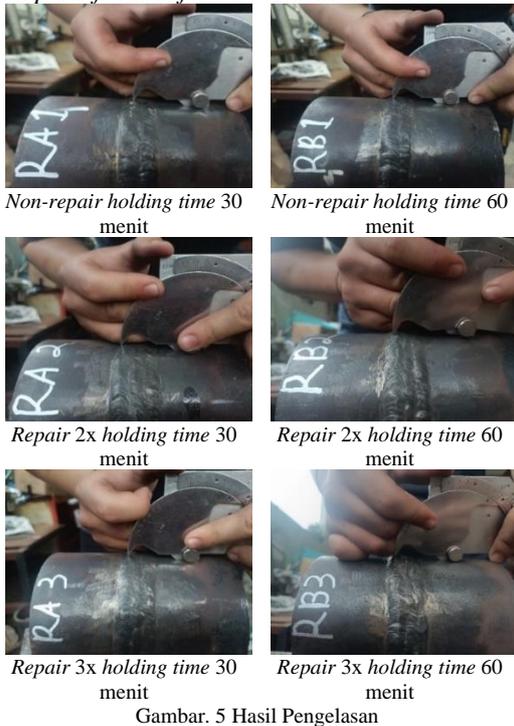
Gambar 4 Titik Pengambilan Nilai Kekerasan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan dari semua pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

3.1 Visual Test

Pada penelitian ini pengujian visual mengacu pada standar ASME sec IX, pada QW-194 yaitu “*Performance Test coupons shall show no cracks and complete joint penetration with complete fusion of weld metal and base metal*”.

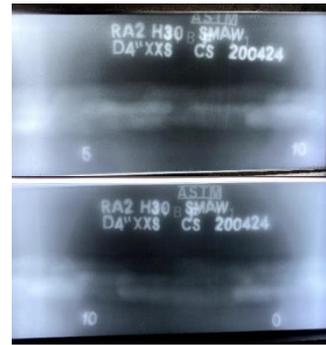


Gambar. 5 Hasil Pengelasan

Mengacu pada ASME section IX [9] maka semua spesimen diterima menurut *acceptance criteria* tersebut. Karena dari semua spesimen tidak ditemukannya *crack* dan seluruh spesimen tidak ada indikasi *incomplete fusion*.

3.2 Hasil Radiografi

Radiography test merupakan pengujian *non destructive test* untuk mengetahui cacat las pada *sub surface weld metal*. Proses *radiography* menggunakan *source type iridium 192* dengan dimensi 3x2,5mm. Jenis *exposure* yang digunakan adalah *double wall singel image (DWSI)* dengan tipe penyinaran *source side* dan *exposure time 1 menit*

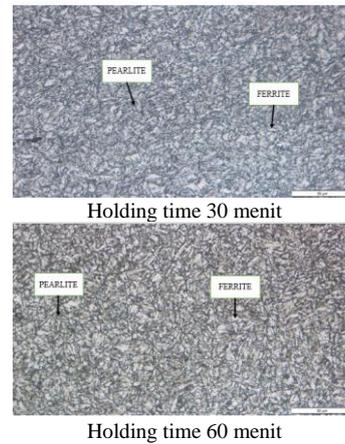


Gambar 6. Hasil Radiography Test

Pada semua hasil repair yang telah dilakukan, tidak ditemukannya indikasi cacat las seperti *crack* atau *incomplete fusion*. Hal ini menjadi penguat hasil *visual test* bahwa proses pengelasan dapat diterima. Dengan demikian, hasil pengujian radiografi ini memberikan keyakinan bahwa sambungan las yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik dan layak untuk digunakan dalam proses pengujian selanjutnya.

3.3 Pengujian Mikro

Pengujian mikro struktur menggunakan mikroskop optik 500X,. Hasil pengujian mikro pada daerah *base metal* dapat dilihat pada Gambar 7



Gambar 7. Hasil Pengujian Mikro pada Daerah Base metal

Dari Gambar 7 dapat dilihat bahwa fasa yang terdapat pada *base metal* adalah fasa *ferrite* dengan warna terang dan *pearlite* dengan warna gelap. Fasa *pearlite* pada baja paduan terdiri dari *ferrite* dan Fe₃C. Fasa *pearlite* pada baja paduan terdiri dari lapisan atau *lamellae* dua fasa yang berselang-seling yaitu *ferrite* dan Fe₃C yang terbentuk secara bersamaan selama transformasi [10].

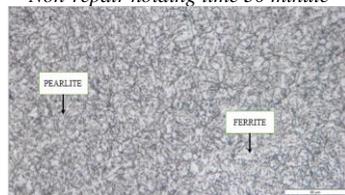
Proses *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* merupakan hal yang penting dilakukan pada pengelasan material *grade P91*, Pada dasarnya material *grade 91* memiliki nilai kekerasan yang sangat tinggi sebelum dilakukannya proses heat treatment, hal ini disebabkan adanya fase *martensite non tempered* yang memiliki sifat keras dan rapuh. Proses PWHT terbukti

menurunkan nilai kekerasan pada material *grade* 91 [11].

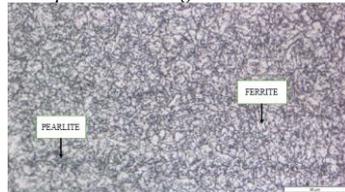
Dapat dilihat pada Gambar 7 pada setiap variasi repair memiliki ukuran butir dan kerapatan butir yang tidak jauh berbeda. Hal ini disebabkan karena panas hasil pengelasan sedikit berpengaruh pada *base metal*, yang berakibat sedikit terjadinya perubahan struktur mikro. Hal ini didukung oleh penelitian dari Mulyadi [12] struktur mikro dari *base metal* tidak berubah karena pada proses pengelasan ini, daerah *base metal* tidak mengalami efek panas yang dapat merubah struktur mikronya. Adanya sedikit perbedaan *holding time* PWHT dimana pada spesimen dengan *holding time* 60 menit memiliki ukuran butir yang lebih besar daripada spesimen dengan *holding time* 30 menit. Hal tersebut dikarenakan semakin lama *holding time* yang terjadi maka akan semakin lama kesempatan butir untuk berkembang. Hasil pengujian mikro pada daerah *Heat Affected Zone* dapat dilihat pada gambar 8



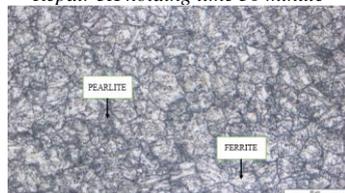
Non-repair holding time 30 minute



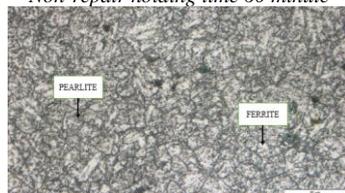
Repair 2X holding time 30 minute



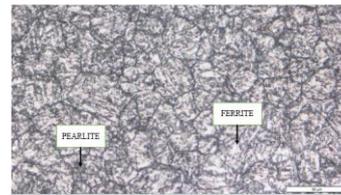
Repair 3X holding time 30 minute



Non-repair holding time 60 minute



Repair 2X holding time 60 minute



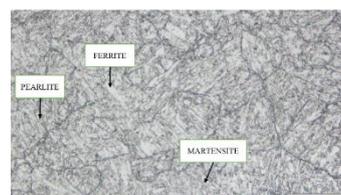
Repair 3X holding time 60 minute

Gambar 8 Hasil Pengujian Mikro pada Daerah HAZ

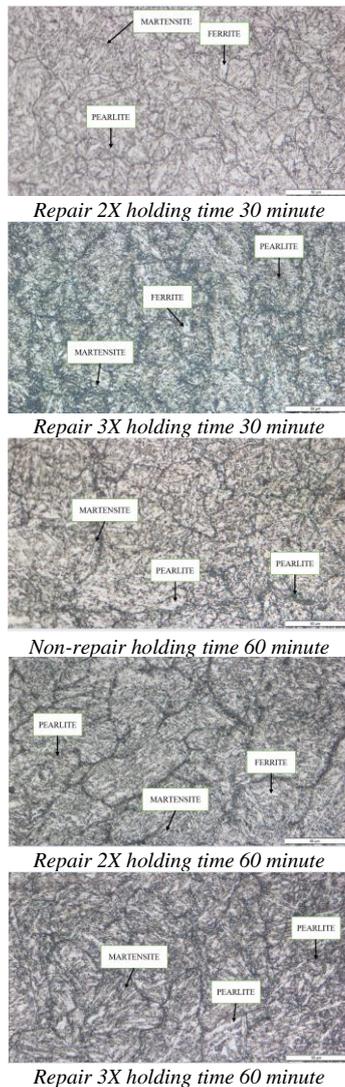
Pada Gambar 8 Fasa yang ada pada daerah HAZ hampir sama dengan daerah *base metal* yaitu *ferrite* dengan warna terang dan *pearlite* ditunjukkan dengan warna gelap. Fase *ferrite* yang terbentuk pada hypoeutectoid adalah *ferrite proeutectoid* dan *ferrite eutectoid*. *Ferrite protoeutectoid* terbentuk sebelum terjadinya reaksi eutectoid pada suhu di bawah A1, sedangkan *ferrite eutectoid* adalah *ferrite* yang terdapat dalam *pearlite*.

Spesimen dengan jumlah *repair* yang lebih banyak struktur mikro yang terlihat lebih dominan berwarna gelap dimana hal ini menunjukkan bahwa struktur mikro di dominasi fasa *pearlite*. Hal ini disebabkan oleh laju difusi lebih tinggi sehingga selama proses transformasi, atom karbon dapat berdifusi dengan jarak yang relatif jauh, membentuk lamellae yang lebih tebal. Seiring dengan penurunan temperatur, laju difusi juga akan menurun, dan lamellae akan menjadi tipis, struktur yang terjadi pada temperatur sekitar 540C ini disebut *fine pearlite* [10]

Proses PWHT dilakukan untuk memperbaiki struktur mikro, spesimen dengan *holding time* 30 menit memiliki struktur mikro yang lebih rapat dibandingkan spesimen dengan *holding time* 60 menit. maka dapat disimpulkan semakin lama *holding time* PWHT maka ukuran butir akan semakin besar karena adanya cukup waktu untuk butiran berkembang, dengan ukuran butir yang semakin besar seiring dengan bertambahnya waktu *holding time* maka nilai kekerasan pada material juga akan menurun. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Wibowo [13] meningkatnya *holding time* akan berakibat pada semakin besar ukuran butirnya, ini disebabkan karena semakin lama waktu *holding time* maka akan tersedia cukup waktu untuk butiran berkembang. Hasil pengujian mikro pada daerah *Weld metal* dapat dilihat pada gambar 9



Non-repair holding time 30 minute



Gambar 9. Hasil Pengujian Mikro pada Daerah *Weld metal*

Pada Gambar 9 dapat diketahui bahwa fasa yang terdapat pada *weld metal* adalah *ferrite* dengan warna terang, *pearlite* dengan warna yang lebih gelap, dan Dari diagram CCT material SA 335 grade P91 yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, efek dari pendinginan yang diberikaan saat proses PWHT diduga terdapat fasa *martensite* yang berbentuk menyerupai jarum atau pelat. Hal ini diperkuat dengan nilai kekerasan pada daerah *base metal* yang tinggi dibandingkan daerah lain. Semakin banyak repair maka masukan panas dari pengelasan akan semakin banyak, hal ini menyebabkan banyak terbentuk fasa *pearlite* yang ditandai dengan hasil foto mikro nampak lebih hitam.

Semakin lama waktu *holding time*, maka ukuran butir akan semakin besar karena adanya cukup waktu untuk butir berkembang, dengan ukuran butir yang semakin besar seiring dengan bertambahnya waktu *holding time* maka nilai kekerasan pada material juga akan menurun. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Wibowo [13] Semakin lama waktu *holding time*

menunjukkan bahwa struktur akhir yang terjadi didominasi oleh fasa *ferrite*. Meningkatnya waktu *holding time* akan berakibat pada semakin besar ukuran butirnya, ini disebabkan karena semakin lama waktu *holding time* maka akan tersedia cukup waktu untuk butir berkembang

3.4 Pengujian Makro

Pada penelitian ini pengujian makro berfokus pada luasa *Heat Affected Zone (HAZ)* yang terbentuk karena banyaknya proses *repair* yang telah dilakukan. Hasil pengujian makro dapat dilihat pada Gambar 10

Jumlah Repair	Holding time PWHT	
	30 Menit	60 Menit
Non-Repair		
2X Repair		
3X Repair		

Gambar 10. Hasil Pengujian Makro

Dari tabel diatas didapatkan data luasan *Heat Affected Zone (HAZ)* yang dapat dilihat pada Tabel 6

Tabel 6 Hasil Perhitungan Luasan HAZ

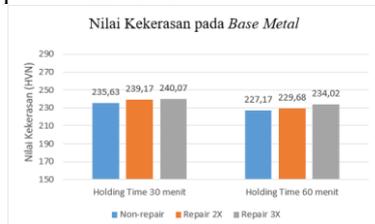
Jumlah Repair	Holding Time	Luasan HAZ (mm ²)		Jumlah Luasan
		Base metal Kiri	Base Metal Kanan	
Non-repair	30 menit	73.32	75.8	149.12
Non-repair		83.03	74.57	157,6
2X Repair		99.40	103.88	203.28
2X Repair	60 menit	79.07	74.79	153.79
3X Repair		84.79	76.65	161.44
3X Repair		102.33	109.25	211.58

Dari semua hasil pengujian makro pada setiap variasi yaitu *non-repair*, *repair 2X* dan *repair 3X* serta variasi *holding time Post Weld Heat Treatment* 30 menit dan 60 menit tidak ditemukan indikasi *welding imperfection*. Pada setiap variasi banyak repair memiliki luasan *Heat Affected Zone (HAZ)* yang berbeda. hal ini dikarenakan adanya perbedaan masukan panas, dimana semakin banyak repair maka masukan panas akan semakin banyak. Dari Penelitian yang

pernah dilakukan oleh Gracia [14] menyatakan bahwa *heat input* dan *travel speed* pengelasan merupakan dua faktor penting yang mempengaruhi pertumbuhan butir di *area Heat Affected Zone* pada proses pengelasan. Masukan panas ini memungkinkan untuk terbentuknya luasan daerah *Heat Affected Zone* yang lebih lebar.

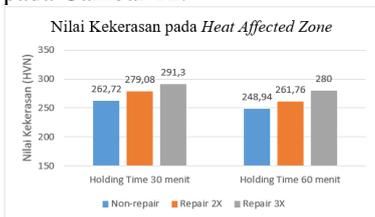
3.5 Hasil pengujian Kekerasan

Pada penelitian ini, pengujian hardness digunakan untuk mengetahui pengaruh *multiple repair* dan perbedaan lama *holding time* PWHT pada material SA335 grade P91. Pengambilan nilai kekerasan dilakukan sebanyak 29 titik yaitu 6 titik pada area *base metal*, 5 titik pada daerah HAZ dan 18 titik pada *weld metal*. Hasil pengujian kekerasan pada daerah *base metal* dapat dilihat pada Gambar 11.



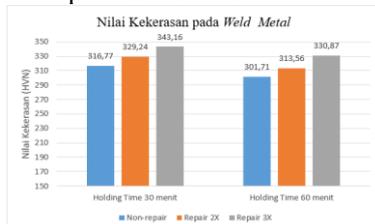
Gambar 11. Hasil Pengujian Kekerasan pada Daerah *Base metal*

Nilai kekerasan pada daerah HAZ dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Hasil Pengujian Kekerasan pada Daerah HAZ

Nilai kekerasan pada daerah *weld metal* dapat dilihat pada Gambar 13



Gambar 13 Hasil Pengujian Kekerasan pada Daerah *Weld metal*

Grafik keseluruhan rata – rata nilai kekerasan ditunjukkan pada Gambar 14



Gambar 14 Perbandingan Nilai Kekerasan di Setiap Daerah

Kesimpulan bahwa, semakin banyak repair maka nilai kekerasan akan semakin tinggi. Tingginya nilai kekerasan dikarenakan banyaknya masukan panas dari proses repair, yang mengakibatkan terbentuknya fasa *pearlite*. Perbedaan nilai kekerasan antara daerah HAZ dan *weld metal* terjadi karena pada daerah *weld metal* terbentuknya fasa *martensite* yang disebabkan oleh tingginya masukan panas dan cepatnya laju pendinginan, karena pendinginan terjadi dengan laju pendinginan yang tinggi maka tidak ada cukup waktu untuk karbon berdifusi keluar dari struktur kristal untuk membentuk martensit [15]

Post Weld Heat Treatment (PWHT) juga berpengaruh terhadap nilai kekerasan. Hal ini dikarenakan tujuan dari PWHT adalah untuk memperbaiki struktur mikro pada material yang menyebabkan penurunan nilai kekerasan. Perbedaan *holding time* pada temperatur yang sama akan menurunkan nilai kekerasan pada material hal ini dapat dikaitkan dengan perbaikan sifat mekanis, rekristalisasi, dan pertumbuhan ukuran butir pada temperatur yang sama dengan *holding time* yang digunakan [16] Semakin lama spesimen menerima perlakuan panas maka nilai kekerasan pada spesimen akan semakin menurun. nilai kekerasan akan menurun seiring dengan bertambahnya waktu *holding time* [17]. Pernyataan tersebut sesuai dengan data yang ada dimana spesimen dengan *holding time* PWHT 60 menit memiliki nilai kekerasan yang lebih rendah dari spesimen dengan *holding time* PWHT 30 menit

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil penelitian “Analisis *Multiple Repair* dan *Holding time Post Weld Heat Treatment* Material SA 335 Grade P91 Dengan Proses Pengelasan SMAW Terhadap Nilai Kekerasan, dan Metalografi” yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

Hasil pengujian kekerasan pada masing masing spesimen menunjukkan bahwa nilai kekerasan akan naik seiring dengan banyaknya proses *repair* yang diberikan. Hal tersebut dikarenakan semakin banyak *repair* maka heat input yang diterima material semakin banyak yang dapat merubah struktur mikro pada material. Dan nilai kekerasan akan semakin menurun seiring dengan penambahan *holding time* dikarenakan semakin lama waktu *holding time* maka semakin lama pula waktu butir akan berkembang sehingga akan menyebabkan nilai kekerasan menurun.

Hasil pengujian metalografi terdapat dua pengujian yaitu pengujian makro dan pengujian mikro. semakin banyak *repair* yang dilakukan maka luasan *Heat Affected Zone* (HAZ) yang terbentuk semakin luas. Lamanya *holding time* PWHT tidak berpengaruh terhadap luasan HAZ.

Hasil pengujian mikro pada masing masing spesimen, semakin banyak proses *repair* yang dilakukan maka fasa *pearlite* akan lebih mendominasi dari pada fasa *ferrite* dan pada daerah *base metal* ditemukan fasa *martensite* yang menyebabkan nilai kekerasan akan meningkat. Perbedaan *holding time* berpengaruh terhadap perbesaran ukuran butir, dimana semakin lama *holding time* maka ukuran butir akan semakin besar yang mengakibatkan nilai kekerasan menurun.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih pertama diberikan kepada kedua orang tua penulis bapak Yakudi dan Ibu Suma'iyah. dan kepada semua pihak yang telah membantu peneliti dalam melakukan pengerjakan tugas akhir ini, seperti dosen pembimbing, dosen pengajar, kakak alumni, teman teman Angkatan 20 prodi Teknik pengelasan dan terkhusus juga untuk Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.

7. PUSTAKA

- [1] a. Arifah and s. Ruswanto, "Efek Post Weld Heat Treatment terhadap Sifat Mekanik AISI 316 Hasil Pengelasan GTAW," *Jurnal Mekanik Terapan*, 2020.
- [2] a. Sharma, d. k. verma and S. kumaran, "Effect of post weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of Hot Wire GTA welded joints of SA213 T91 steel," *ScienceDirect*, 2018.
- [3] A. Wibowo, H. Widiastuti, N. L. arifin and N. P. Aryanto, "Pengaruh Holding Time Annealing terhadap Perubahan Mikrostruktur Baja Struktur S690QL dan S235JR," *Jurnal Integrasi*, 2021.
- [4] ASME B31.3 , ASME Boiler & Preassure Vessel Code Ferrous Material Specification, 2022.
- [5] ASME Sec II part A1, ASME Boiler & Preassure Vessel Code Ferrous Material Specification, 2021.
- [6] ASME sec II part C, ASME Boiler & Preassure Vessel Code Ferrous Material Specification, 2021.
- [7] ASME sec IX, American Society of Mechanical Engineers Boiler and Preassure Vessel Code, 2021.
- [8] ASME, "Power Piping- ASME Code for Pressure Piping, B 31.1-2007," in *Power Piping- ASME Code for Pressure Piping*, ASME, 2022.
- [9] F. J. G. Silva, A. P. pinho, A. B. pereira and O. C. paiva, "Evaluation of Welded Joints in P91 Steel under Different Heat-Treatment Conditions," *metals*, 2020.
- [10] g. Garcia, hernandez-belmontes and i. mejia, "effect of the Heat Input on the Heat Affected Zone in the Austenitic Stainless Steel Welding by GTAW Process-An Experimental and Computational Analysis," *MRS Advances*, 2017.
- [11] I. K. Rohmat, M. S. Amri, M. M. Munir, H. B. Kurniyanto and M. H. Muzzakki, "ANALISIS HOLDING TIME POST WELD HEAT TREATMENT," 2023.
- [12] K. Mithun, K. Saraswathamma and D. K. Verma, "Effect of post weld heat treatment soaking time on microstructure and mechanical properties of TIG welded grade 91 steel," *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 2019.
- [13] M. M. Munir, M. T. Wahyudi, H. B. Kurniyanto and D. Anggara, Modul Praktek DT NDT, Surabaya: PPNS, 2019.
- [14] M. T. Wahyudi and P. Sidi, Analisis Kekerasan Pada Pipa Yang Dibengkokan, Surabaya, 2012.
- [15] v. s. Sardi, s. jokosisworo and h. yudo, "Pengaruh Normalizing dengan Variasi Waktu Penahanan Panas(Holding Time) Baja ST 46 terhadap Uji Kekerasan, Uji Tarik, dan Uji Mikrografi," *JURNAL TEKNIK PERKAPALAN*, 2018.
- [16] W. D. Callister, "Materials science and engineering: An introduction (2nd edition)," *Materials & Design*, 1991.
- [17] Y. Mulyadi, H. Supomo and W. D. P., "ANALISA PENGARUH MULTIPLE REPAIR WELDING PADA MATERIAL PROPERTIES WELD JOINTPIPA ASTM A105 Gr.B SCH 80," 2018.