

Perbandingan PWHT dan Non PWHT pada Pengelasan Material SA-213 Grade T91 dengan SA-213 Grade T22 terhadap Struktur Mikro dan Kekerasan

Imam Khoirul Rohmat*, Moh. Syaiful Amri, M. Habib Muzzakki, Hendri Budi Kurniyanto, Mukhlis, Moh. Miftachul Munir

Teknik Pengelasan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya,
Kampus ITS Keputih Sukolilo, Surabaya, 60111

* E-mail: imamkhoirulrohmat@ppns.ac.id

Diterima: 03-01-2023; Direvisi: 24-03-2023; Dipublikasi: 20-04-2023

Abstrak

Superheater adalah salah satu komponen *boiler* yang berfungsi untuk memanaskan uap jenuh yang keluar dari *steam drum*, material yang sering digunakan pada *superheater* adalah SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22, pada penelitian ini menggunakan proses pengelasan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Kedua material yang digunakan wajib dilakukan proses PWHT, karena salah satu tujuan PWHT adalah menurunkan nilai kekerasan dan menyeragamkan struktur mikro. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan PWHT dan tanpa PWHT pada material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 terhadap struktur mikro dan kekerasan. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan adanya pengurangan prosentase *pearlite* serta *martensite* dan adanya penambahan ukuran butir struktur mikro setelah PWHT. Pengujian hardness vickers menunjukkan adanya penurunan nilai kekerasan yang signifikan, khususnya pada daerah *weld metal* dan HAZ antara material tanpa PWHT dan PWHT. Didapatkan nilai kekerasan tertinggi pada *weld metal* SA-213 grade T91 tanpa PWHT dengan nilai kekerasan 376.70 HVN dan nilai terendah *weld metal* ada pada spesimen dengan *holding time* 45 menit yaitu sebesar 201.1 HVN.

Kata kunci: *Hardness Vickers; Holding Time; PWHT; Struktur Mikro; Superheater*

Abstract

The superheater is one of the boiler components that functions to heat saturated steam that comes out of the steam drum, the material that is often used in superheaters is SA-213 grade T91 and SA-213 grade T22, in this study using the Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) welding process. The two materials used must be subjected to the PWHT process, because one of the goals of PWHT is to reduce the hardness value and to homogenize the microstructure. This study aims to determine the comparison of PWHT and without PWHT on the material SA-213 grade T91 and SA-213 grade T22 on microstructure and hardness. The results of microstructure testing showed a reduction in the percentage of pearlite and martensite and an increase in the grain size of the microstructure after PWHT. Hardness vickers test showed a significant decrease in hardness values, especially in the weld metal and HAZ areas between materials without PWHT and PWHT. The highest hardness value was obtained for weld metal SA-213 grade T91 without PWHT with a hardness value of 376.70 HVN and the lowest value for weld metal was on a specimen with a holding time of 45 minutes, which was 201.1 HVN.

Keywords: *Hardness Vickers; Holding Time; Microstructure; PWHT; Superheater*

1. Pendahuluan

Superheater adalah salah satu komponen *boiler* yang berfungsi untuk memanaskan uap jenuh yang keluar dari *steam drum*, dengan memanfaatkan gas hasil pembakaran. Oleh karena itu pemilihan material, perlakuan, dan proses pengelasan harus diperhatikan. Karena *superheater* adalah salah satu komponen *boiler* yang beroperasi pada *temperature* dan tekanan tinggi. Material yang digunakan pada *superheater* harus mampu beroperasi pada *temperature* dan tekanan tinggi, salah satunya adalah material *alloy steel* SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22. Material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 adalah baja paduan (*alloy steel*) dengan komposisi *Chromium*, *Molybdenum*, dan *Vanadium*. Berdasarkan ASME sec. II Part A (2021) [1] kandungan *Chromium*, *Molybdenum*, dan *Vanadium* pada material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 dapat diketahui pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan *Chromium*, *Molybdenum*, dan *Vanadium* pada Material SA-213 Grade T91 dan SA-213 Grade T22 [1]

Material	Chemical Composition		
	Chromium (Cr)	Molybdenum (Mo)	Vanadium (V)
SA-213 grade T91	8% – 9.5%	0.85% - 1.05%	0.18% - 0.25%
SA-213 grade T22	1.9% - 2.6%	0.87% - 1.13%	-

Penelitian ini menggunakan material SA-213 grade T91 dengan *outside* diameter 44.45 mm dan ketebalan 5.8 mm, sedangkan pada material SA-213 grade T22 memiliki *outside* diameter 50.8 mm dan ketebalan 10.6 mm. Akibat adanya perbedaan *outside* diameter dan ketebalan dari kedua material yang digunakan, maka *inside* diameter kedua material juga berbeda, sehingga harus dilakukan proses *cold work* berupa proses *swaging* pada material SA-213 grade T91 untuk menyamakan *inside* diameter dengan material SA-213 grade T22. Dengan adanya *swaging* pada material yang dilas akan mengakibatkan nilai kekerasan meningkat [2].

Material yang digunakan pada penelitian ini wajib dilakukan PWHT setelah pengelasan, sebagaimana merujuk pada ASME B31.1.

Tabel 2. Exemptions to Mandatory Post Weld Heat Treatment [3]

P-Number and Group Number	Control Thickness in. (mm)	Type of Weld	Additional Limitations Required for Exemption From PWHT
P-No. 5A, Group 1	$\leq \frac{5}{8}$ (16)	Groove	<ul style="list-style-type: none"> The mandatory preheat has been applied Specified carbon content of the base metal \leq 0.15% Multiple layer welds are used when the nominal material thickness $> \frac{3}{16}$ in. (5 mm)
P-No. 15E	No exemptions to PWHT	-	-

PWHT adalah proses perlakuan panas (*heat treatment*) yang dilakukan pada material setelah proses pengelasan dilakukan. Fokus penelitian ini adalah pada *Holding Time Post Weld Heat Treatment*, karena *holding time* akan berpengaruh pada struktur mikro dan sifat mekanis pada material. Proses pengelasan akan meningkatkan kekerasan material atau hasil las karena struktur material lebih didominasi *ferrite* dan butiran yang semakin kecil sehingga akan meningkatkan nilai kekerasan, namun nilai kekerasan akan menurun seiring dengan bertambahnya waktu *holding time* [4]. Semakin lama waktu *holding time* maka nilai kekerasan akan menurun, kenaikan waktu *holding time* akan menyebabkan kekerasan mikro pada HAZ dan *weld metal* menurun [5].

2. Material dan metodologi

Penelitian ini dilakukan secara bertahap. Dimulai dari studi literatur dan studi lapangan, perumusan masalah dan penetapan tujuan, persiapan alat dan spesimen, *swaging*, *preheat* dan pengelasan, PWHT dengan *holding time* 45 menit, pengujian *hardness vickers* dan struktur mikro, analisa data, pembahasan dan kesimpulan.

1) Studi Literatur dan Studi Lapangan

Studi literatur dan studi lapangan pada penelitian ini meliputi pengumpulan sumber referensi dan data yang akan dijadikan dasar selama penelitian berlangsung. Referensi tersebut bersumber dari *code*, *standard*, *WPS*, *mill certificate*, jurnal dan modul. Semua studi literatur dan studi lapangan yang dilakukan berkaitan dengan topik yang diangkat pada penelitian.

2) Perumusan Masalah dan Penetapan Tujuan

Setelah didapatkan pemahaman dari studi literatur dan studi lapangan terkait topik yang diangkat dengan permasalahan yang ada, maka didapatkan rumusan masalah dan tujuan dari penelitian yang dilakukan. Sehingga didapatkan topik yang relevan untuk dijadikan objek penelitian.

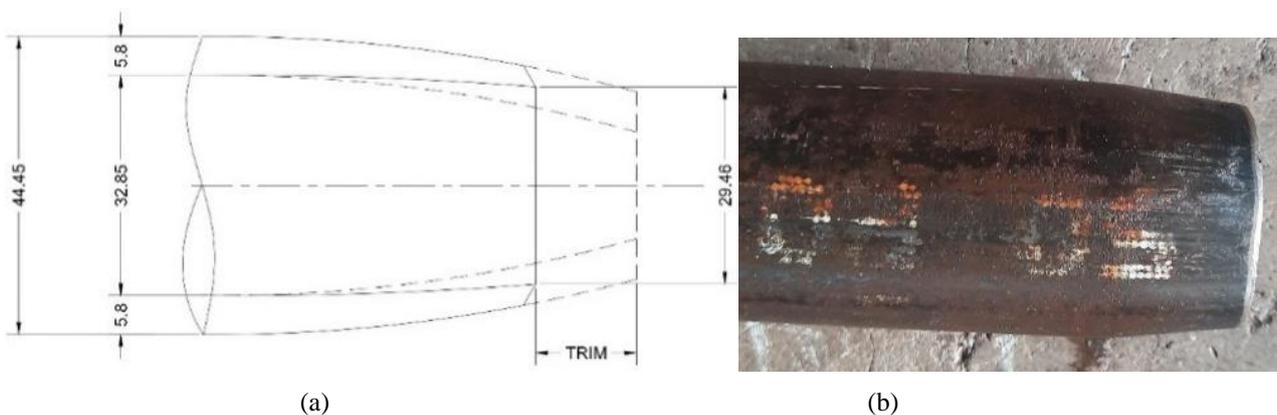
3) Persiapan Alat dan Spesimen

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah baja paduan SA-213 *grade* T91 dan SA-213 *grade* T22 menggunakan proses pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). *filler metal* ER90S-B3 dengan tipe sambungan *butt joint single V*. Masing-masing variasi diberikan notasi yang berbeda, yaitu :

- A0 Non PWHT.
- A1 dengan *holding time* 45 menit.

4) Swaging

Proses *swaging* pada penelitian ini hanya dilakukan pada material SA-213 *grade* T91, *swaging* dilakukan untuk menyamakan *inside* diameter material antara SA-213 *grade* T91 dan SA-213 *grade* T22. Desain dan hasil *swaging* dapat dilihat pada Gambar 1.

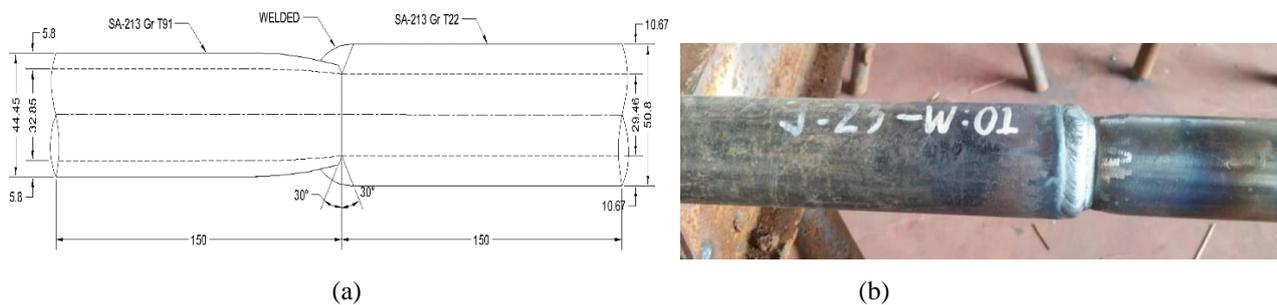


Gambar 1. (a) Desain *Swaging*; (b) Hasil *Swaging* Material SA-213 *grade* T91

5) Proses Pengelasan dan *Preheat*

Preheat dilakukan sebelum proses pengelasan dilakukan, *preheat* dilakukan pada kedua material yang digunakan. Proses *preheat* dilakukan dengan menggunakan *blander oxy acetylene*. *Temperature preheat* yang digunakan mengacu pada *Welding Procedure Specification* (WPS) yang digunakan yaitu minimal *temperature preheat* 204°C. Proses pengelasan dilakukan setelah *preheat* telah dilakukan pada masing-masing spesimen. Pengelasan menggunakan *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) dengan *filler metal* ER90S-B3 pada posisi 1G.

Proses pengelasan menggunakan *backing gas* dan *shielding gas* Argon 99.98% dengan *flow rate* 15 l/min. Desain sambungan dan hasil pengelasan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) Desain Sambungan Pengelasan; (b) Hasil Pengelasan

6) Proses PWHT

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *holding time* PWHT terhadap struktur mikro dan nilai kekerasan pada material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22, sehingga pada spesimen dengan *holding time* 45 menit dilakukan PWHT setelah proses pengelasan, sedangkan spesimen non PWHT bisa langsung ke tahap selanjutnya. Tujuan dari proses PWHT adalah untuk mendapatkan struktur mikro yang homogen dan menurunkan nilai kekerasan. Nilai kekerasan pada *weld metal* T91 akan menurun seiring dengan bertambahnya waktu *holding time* [6]. Mengacu pada ASME Section I (2021) [7] dan ASME Section VIII Division 1 (2019) UCS 56[8], PWHT pada material *alloy steel* pada *temperature heating* 425°C harus dicatat, pada saat *temperature* 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 *temperature* berada di atas 425°C pendinginan dilakukan secara perlahan di dalam *furnace* dan saat *temperature* 425°C material dapat dikeluarkan dan didinginkan di udara bebas sampai *temperature* kamar. Proses PWHT dilakukan sesuai ASME Section VIII Division I.

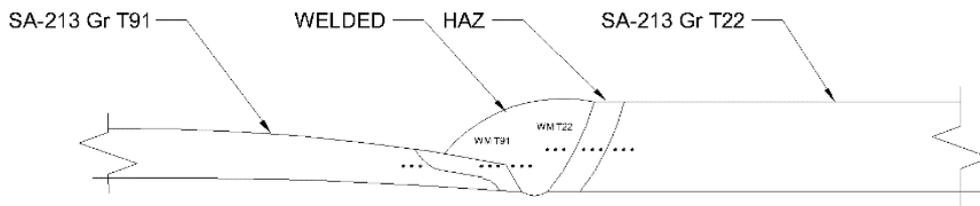
7) Pengujian Struktur Mikro

Penelitian ini berfokus pada pengujian mikro struktur dengan tujuan untuk mengetahui ada atau tidaknya perubahan struktur mikro dan perubahan nilai kekerasan antara material non PWHT dan material yang mengalami PWHT pada *holding time* PWHT. Pengujian *metallography* bertujuan untuk mengetahui kondisi struktur serta arah perubahan struktur mikro [9]. Material yang akan diuji struktur mikro terlebih dahulu dilakukan proses penghalusan permukaan berupa proses *grinding* dan *polishing*, setelah permukaan material telah halus selanjutnya material dilakukan etsa menggunakan larutan nital 2% dengan komposisi 2 ml HNO₃ dan 98 Alkohol.

8) Pengujian *Hardness Vickers*

Pada penelitian metode yang digunakan untuk pengujian kekerasan adalah metode *hardness vickers*. *Hardness test* adalah salah satu jenis pengujian *Destructive Test* (DT) atau uji merusak yang bertujuan untuk mengetahui nilai kekerasan suatu material pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal*. *Hardness test* dilakukan dengan menggunakan metode *Hardness Vickers* (HVN) menggunakan pembebanan sebesar 10 Kgf dengan waktu pembebanan 15 detik. *Hardness test* dilakukan pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal* dengan total titik pengujian *hardness* sebanyak 18 titik pada masing-masing spesimen. Jarak indentasi pertama pada masing-masing

daerah adalah 1.5 mm dan jarak antar indentasi adalah 1 mm. Lokasi titik pengambilan uji kekerasan dapat dilihat pada Gambar 3.

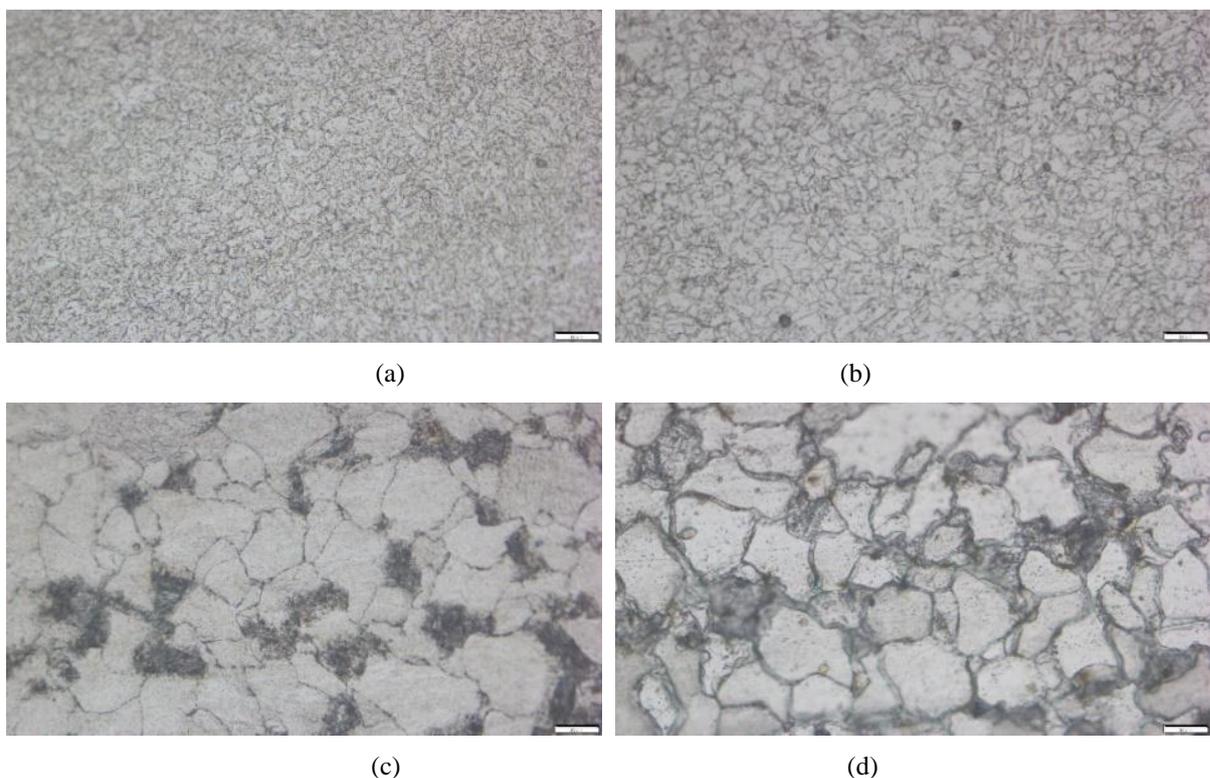


Gambar 3: Titik Pengujian *Hardness*

3. Hasil dan pembahasan

1) Pengujian Struktur Mikro

Pengujian mikro dilakukan untuk mengetahui mikro struktur dan perubahan struktur mikro pada spesimen tanpa mendapatkan perlakuan PWHT dengan spesimen dengan perlakuan PWHT pada *temperature* 750°C dan *holding time* 45 menit. Hasil pengujian struktur mikro pada masing-masing daerah adalah sebagai berikut:

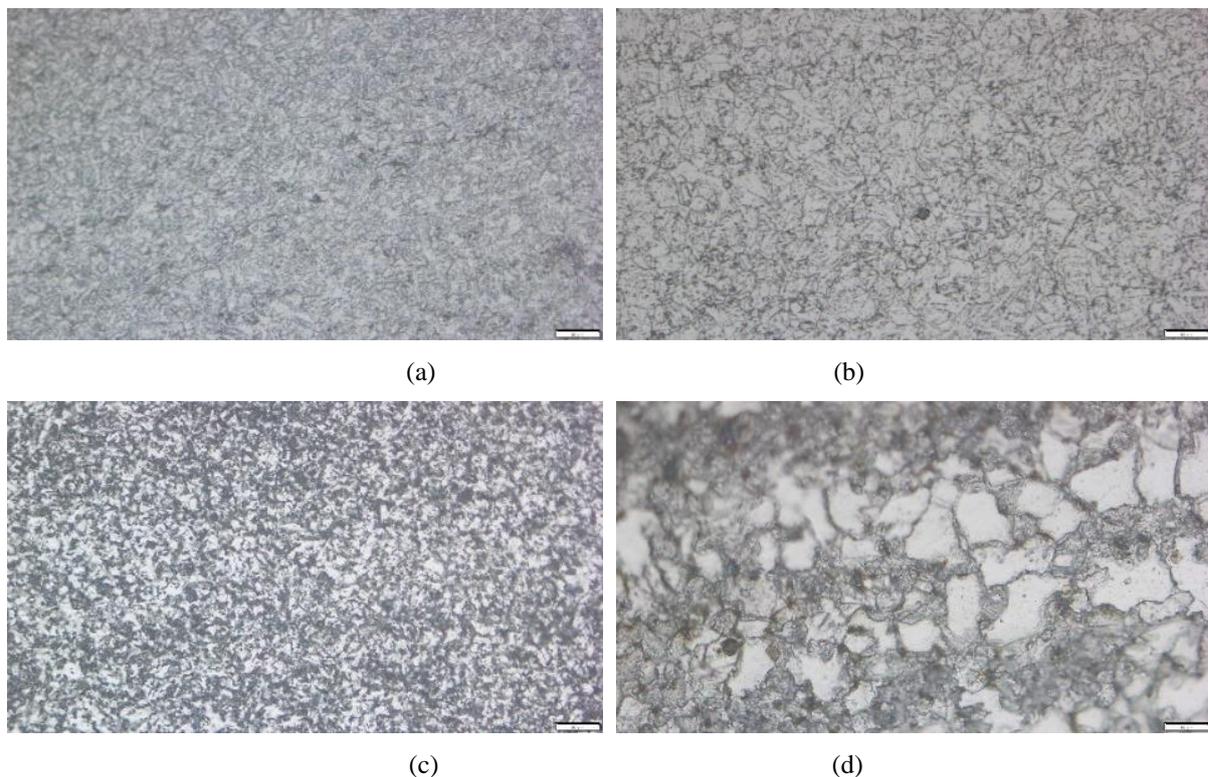


Gambar 4. Struktur Mikro Pada *Base Metal* Material SA-213 *Grade* T91 dan SA-213 *Grade* T22 (Perbesaran 500X) : (a) SA-213 *Grade* T91 Tanpa PWHT; (b) SA-213 *Grade* T91 *Holding Time* 45 Menit; (c) SA-213 *Grade* T22 Tanpa PWHT; (d) SA-213 *Grade* T22 *Holding Time* 45 Menit

Gambar 4 menunjukkan struktur mikro daerah *base metal* material SA-213 *grade* T91 dan SA-213 *grade* T22 pada spesimen tanpa PWHT dan PWHT *holding time* 45 menit. Dapat diketahui pada perbesaran 500x fasa yang terlihat adalah *ferrite* dan *pearlite*. Fasa *ferrite* yang terjadi pada *hypoeutektoid* adalah *ferrite proeutectoid* dan *ferrite eutektoid*. *Ferrite proeutectoid* adalah *ferrite* yang terbentuk sebelum terjadinya reaksi *eutektoid* pada *temperature*

di bawah A1, sedangkan *ferrite eutektoid* adalah *ferrite* yang terdapat pada *pearlite*. Fasa *pearlite* pada baja paduan terdiri dari *ferrite* dan Fe₃C, *ferrite* menunjukkan warna terang dan Fe₃C menunjukkan warna gelap. 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].

Dapat diketahui bahwa semakin lama waktu *holding time*, fasa *ferrite* semakin mendominasi daripada fasa yang lain. Dapat dilihat bahwa semakin lama waktu *holding time*, 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. Menurut Wibowo, *et al*, [11] 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 butiran berkembang.

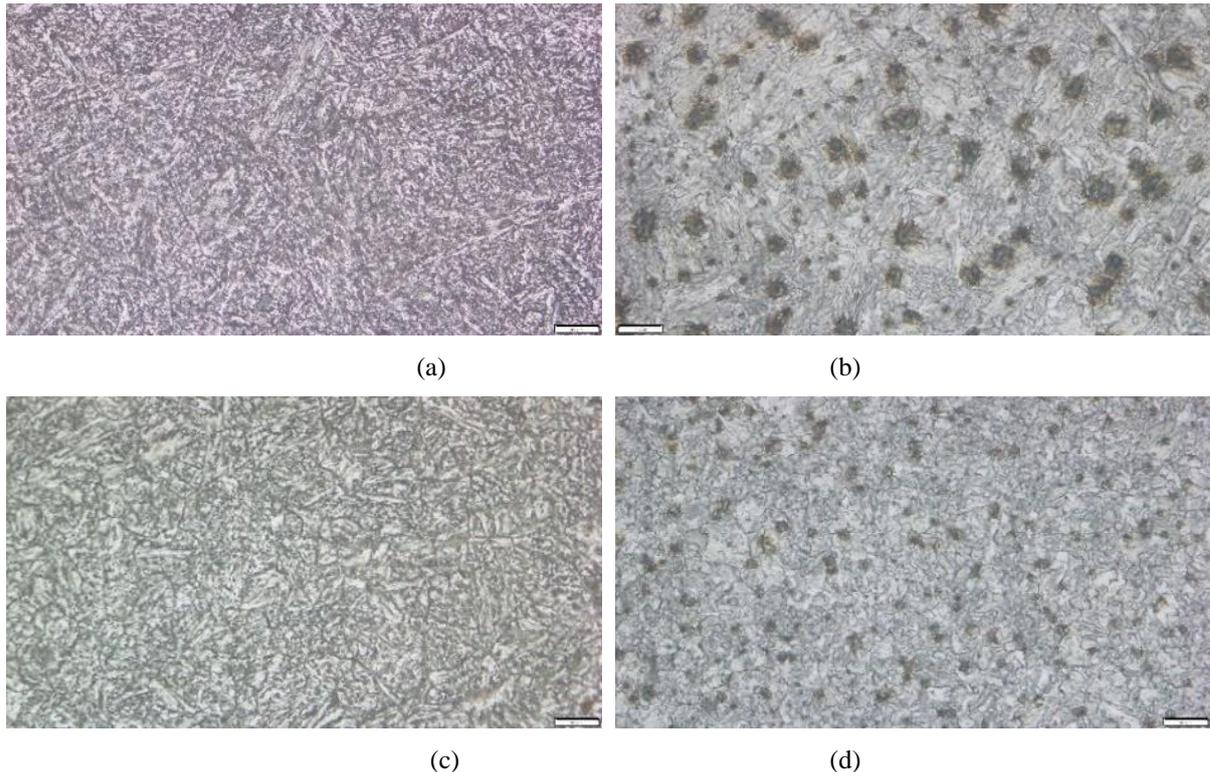


Gambar 5. Struktur Mikro Pada HAZ Material SA-213 *Grade* T91 dan SA-213 *Grade* T22 (Perbesaran 500X): (a) SA-213 *Grade* T91 Tanpa PWHT; (b) SA-213 *Grade* T91 Holding Time 45 Menit; (c) SA-213 *Grade* T22 Tanpa PWHT; (d) SA-213 *Grade* T22 Holding Time 45 Menit

Gambar 5 menunjukkan struktur mikro daerah HAZ pada material SA-213 *grade* T91 dan SA-213 *grade* T22 pada spesimen tanpa PWHT dan PWHT *holding time* 45 menit. Dapat diketahui pada perbesaran 500x fasa yang terlihat adalah *ferrite* dan *pearlite*. Gambar 5 menunjukkan adanya pengurangan prosentase *pearlite*, semakin lama waktu *holding time* prosentase *ferrite* akan meningkat sedangkan prosentase *pearlite* akan menurun, ini menandakan semakin lama waktu *holding time* maka nilai kekerasan pada material juga akan menurun karena fasa *pearlite* lebih keras daripada fasa *ferrite*.

Namun dapat diketahui bahwa prosentase *pearlite* yang ada pada HAZ akan berkurang seiring dengan bertambahnya waktu *holding time*, hasil akhir akan lebih didominasi oleh fasa *ferrite*, ini menunjukkan bahwa

bertambahnya waktu *holding time* akan berakibat turunnya nilai kekerasan. Menurut Li, Deceuster and Griffiths [12] Mengenai pengaruh pengaruh PWHT pada material *grade* T91 yang menyatakan bahwa penambahan *temperature* PWHT dan penambahan waktu *holding time* nilai kekerasan akan menurun karena bentuk butiran akan menurun dan struktur mikro lebih homogen. Ini menunjukkan bahwa adanya pengaruh penambahan waktu *holding time* dengan penurunan nilai kekerasan yang diakibatkan adanya perbedaan struktur mikro akhir antara material tanpa PWHT dengan material yang mengalami perlakuan PWHT. Pada daerah HAZ nilai kekerasan cenderung menurun seiring dengan bertambahnya waktu *holding time* pada proses PWHT, jika dihubungkan dengan fasa nilai kekerasan menurun karena adanya penambahan waktu *holding time* struktur akhir material akan lebih didominasi oleh *ferrite* [13].



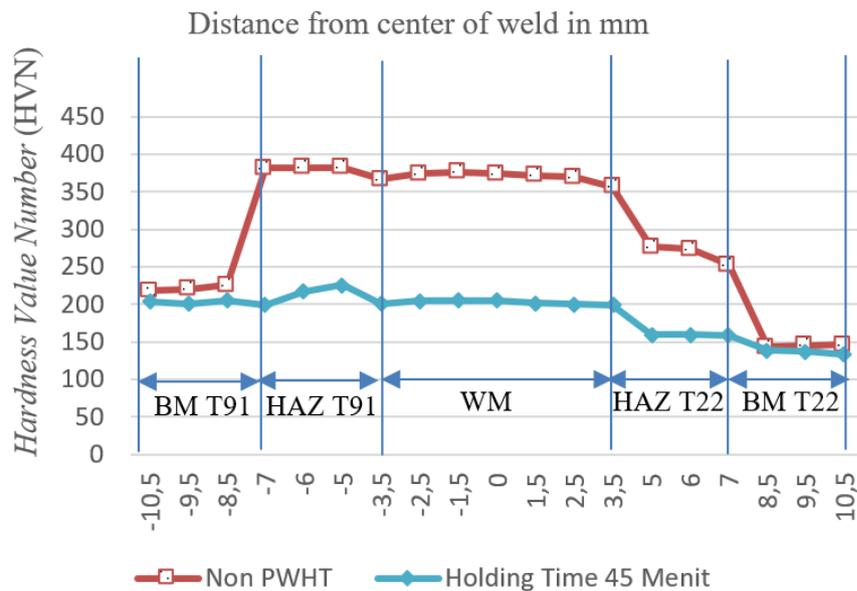
Gambar 6. Struktur Mikro Pada *Weld Metal* Material SA-213 *Grade* T91 dan SA-213 *Grade* T22 (Perbesaran 500X) : (a) SA-213 *Grade* T91 Tanpa PWHT; (b) SA-213 *Grade* T91 *Holding Time* 45 Menit; (c) SA-213 *Grade* T22 Tanpa PWHT; (d) SA-213 *Grade* T22 *Holding Time* 45 Menit.

Gambar 6 menunjukkan struktur mikro daerah *weld metal* pada material SA-213 *grade* T91 dan SA-213 *grade* T22 pada spesimen tanpa PWHT dan PWHT *holding time* 45 menit. Dapat diketahui pada perbesaran 500x fasa yang terlihat adalah *ferrite*, *pearlite* dan *martensite*. Dalam pembentukannya *martensite* bersaing dengan *bainite* dan *pearlite*, transformasi *martensite* terjadi ketika laju pendinginan cukup cepat untuk mencegah difusi karbon. Struktur *martensite* adalah struktur yang tidak stabil ketika baja dipanaskan sampai *temperature* di *temperature* austenitik dan kemudian didinginkan dengan laju pendinginan yang relatif cepat sehingga tidak adanya cukup waktu untuk difusi karbon [14]. Namun dapat diketahui bahwa prosentase *martensite* yang ada pada *weld metal* akan berkurang seiring dengan bertambahnya waktu *holding time*, hasil akhir akan lebih didominasi oleh fasa *ferrite*, ini menunjukkan bahwa bertambahnya waktu *holding time* akan berakibat turunnya nilai kekerasan. Struktur mikro pada *weld metal* menunjukkan *martensite* yang lebih halus yang berkontribusi menurunkan nilai kekerasan pada

weld metal [15]. Ini menunjukkan bahwa adanya pengaruh penambahan waktu *holding time* dengan penurunan nilai kekerasan yang diakibatkan adanya perbedaan struktur mikro akhir antara material tanpa PWHT dengan material yang mengalami perlakuan PWHT.

2) Pengujian *Hardness Vickers*

Pengujian *hardness vickers* dilakukan pada daerah *base metal*, HAZ dan *weld metal*. *Hardness test* dilakukan dengan menggunakan metode *Hardness Vickers* (HVN) menggunakan pembebanan sebesar 10 Kgf dengan waktu pembebanan 15 detik. Jarak indentasi pertama pada masing-masing daerah adalah 1.5 mm dan jarak antar indentasi adalah 1 mm.



Gambar 7. Nilai kekerasan Tiap-Tiap Daerah

Nilai kekerasan pada *weld metal* serta HAZ SA-213 *grade* T91 dan SA-213 *grade* T22 mengalami penurunan nilai kekerasan yang signifikan setelah adanya proses PWHT, nilai kekerasan tertinggi pada masing-masing daerah ada pada material *non* PWHT dan nilai kekerasan terendah ada pada material dengan *holding time* 45 menit. Semakin lama material mengalami perlakuan panas, maka semakin berkurang nilai kekerasannya. Penurunan nilai kekerasan tersebut diakibatkan oleh pengaruh waktu *holding time* material yang mengalami perlakuan panas, selain itu dengan adanya *holding time* maka struktur mikro pada spesimen akan berubah dan lebih homogen dari pada material yang tidak mengalami perlakuan [16]. Pernyataan tersebut sesuai dengan hasil pengujian kekerasan yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan waktu *holding time* nilai kekerasan akan menurun. Proses PWHT akan berakibat menurunnya nilai kekerasan khususnya pada daerah HAZ, hal ini dikarenakan struktur yang terbentuk akibat dari adanya proses PWHT akan menjadi lebih homogen sehingga sehingga diperoleh nilai kekerasan yang lebih merata dari pada material yang tidak mengalami proses PWHT [12].

Pengambilan titik untuk uji kekerasan diambil 1 mm antar indentasi dan 1,5 mm pada indentasi pertama masing-masing daerah. Data hasil pengujian kekerasan dapat diketahui bahwa semakin jauh jarak pengambilan titik pengujian kekerasan maka akan menunjukkan nilai kekerasan yang berbeda, pada umumnya akan menurun. Semakin jauh pengambilan titik pengujian kekerasan dari *center of weld* umumnya nilai kekerasan akan menurun, ini terjadi karena semakin jauh dari *center of weld* maka paparan panas akibat proses pengelasan akan menurun serta

laju pendinginan akan menurun. Selama proses pengelasan karena *temperature* pemadatan yang tinggi akan terbentuk *ferrite* selama proses pengelasan, dengan adanya *ferrite* akan membatasi ukuran butir dan pertumbuhan butir dari mikro struktur las. Dapat diketahui bahwa terjadi penurunan nilai kekerasan antara spesimen yang tidak mengalami PWHT dengan spesimen yang mengalami PWHT. Terjadi penurunan nilai kekerasan seiring bertambahnya waktu *holding time*, menurunnya nilai kekerasan dapat disebabkan oleh distribusi karbida, semakin lama waktu *holding time* maka akan semakin sedikit presipitasi karbida yang muncul [17].

4. Kesimpulan

Dari hasil analisa dan pembahasan mengenai pengaruh holding time PWHT material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 dengan variasi tanpa PWHT dan PWHT dengan holding time 45 menit, maka didapatkan kesimpulan bahwa adanya proses PWHT akan mempengaruhi struktur mikro pada material, dengan adanya PWHT prosentase *ferrite* akan meningkat dan prosentase *pearlite* serta *martensite* akan menurun. Proses PWHT juga menjadikan ukuran butir struktur mikro akan lebih besar. Selain itu juga terdapat penurunan nilai kekerasan antara material tanpa PWHT dengan material yang mengalami PWHT, khususnya pada daerah *weld metal* dan HAZ. Didapatkan nilai kekerasan tertinggi pada *weld metal* SA-213 grade T91 tanpa PWHT dengan nilai kekerasan 376.70 HVN dan nilai terendah *weld metal* ada pada spesimen dengan *holding time* 45 menit yaitu sebesar 201.1 HVN.

Daftar Pustaka

- [1] ASME sec. II Part A. Ferrous Material Specifications (Beginning to SA-450). 2021.
- [2] Katavić, B., Nikačević, M. and Odanović, Z. Effect of cold swaging and heat treatment on properties of the P/M 91W-6Ni-3Co heavy alloy. *Science of Sintering* 40(3). 2008. pp. 319–331.
- [3] ASME B31.1. Power Piping - ASME Code for Pressure Piping, B31.1-2007. 2020
- [4] Syukran, S., Azwinur, A. and Ferdiyansyah, F. The Effect of Holding Time on Stress Relief Annealing Process to Hardness of Carbon Steel SA. 106 Grade B After Welding. *SINTEK JURNAL*, June 2020. pp. 46–51.
- [5] Arifah, A. and Ruswanto, S. Efek Post Weld Heat Treatment terhadap Sifat Mekanik AISI 316 Hasil Pengelasan GTAW. *Jurnal Mekanik Terapan*, 1(2) 2020. pp. 81–87.
- [6] Liu, Y. et al. Material flow in infeed rotary swaging of tubes. *Materials*, 14(1) 2021. pp. 1–19.
- [7] ASME Section I 2021. 2021.
- [8] ASME Section VIII Division 1. 2019. p. 717.
- [9] Purnomo, D.J., Jokosisworo, S. and Budiarto, U. Analisa Pengaruh Holding Time Tempering Terhadap Kekerasan, Keuletan, Ketangguhan dan Struktur Mikro Pada Baja ST 70. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 7(1) 2019. pp. 49–58.
- [10] Callister, W.D. *Materials science and engineering: An introduction* (2nd edition). *Materials & Design*, 12(1) 1991. p. 59.
- [11] Wibowo, A. et al. Pengaruh Holding Time Annealing terhadap Perubahan Mikrostruktur Baja Struktur S690QL dan S235JR. *Jurnal Integrasi*, 13(1) 2021. pp. 46–52.
- [12] Li, L., Deceuster, A. and Griffiths, B. Table 2 - Average Impact Energy Values for Various Simulated HAZs, and the Base and Filler Metals in Both the As-Welded and Heat-Treated Conditions. *Welding Research*, 92(March) 2013. pp. 80–87.
- [13] Ari, M. Analisis Temperatur PWHT dan Holding Time pada Sambungan Las Material SA 387 Grade 11 Class 1 Terhadap Nilai Kekerasan dan Struktur Mikro. *Inovtek Polbeng*, 9(2) 2019. p. 395.

- [14] Mithun, K., Saraswathamma, K. and Verma, D.K. 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*, 29(2) 2019. pp. 42–50.
- [15] Dey, H.C. et al. Effect of post-weld heat treatment (PWHT) time and multiple PWHT on mechanical properties of multi-pass TIG weld joints of modified 9Cr-1Mo steel. *Welding in the World*, 58(3) 2014. pp. 389–395.
- [16] Bhaskara Sardi, V., Jokosisworo, S. and Yudo, H. Pengaruh Normalizing dengan Variasi Waktu Penahanan Panas (Holding Time) Baja ST 46 terhadap Uji Kekerasan, Uji Tarik, dan Uji Mikrografi. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 6(1) 2018. p. 142.
- [17] Paristiawan, P.A. et al. Pengaruh Variasi Media. *Jurnal Rekayasa Mesin*, (March) 2021. pp. 573–580.