

ANALISIS *HOLDING TIME POST WELD HEAT TREATMENT* (PWHT) PADA PENGELASAN MATERIAL SA-213 GRADE T91 DENGAN SA-213 GRADE T22 UNTUK APLIKASI BOILER

Imam Khoirul Rohmat ¹⁾ ✉, Moh. Syaiful Amri ¹⁾, Mohammad Miftachul Munir ¹⁾, Hendri Budi Kurniyanto ¹⁾, M. Habib Muzzakki ¹⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Pengelasan
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
imamkhoirulrohmat@ppns.ac.id
amri@ppns.ac.id
m.munir@ppns.ac.id
hendribudi@ppns.ac.id
muzzakki.habib12@gmail.com

Abstract

Superheater is one of the boiler components that works to heat the saturated steam coming out of the steam drum, by utilizing hot gases from combustion. In this study using Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) and using SA-213 grade T91 and SA-213 grade T22, these two materials require Post Weld Heat Treatment (PWHT). One of the crucial factors in PWHT is holding time, because holding time aims to obtain a homogeneous temperature and homogeneous microstructure and can affect the mechanical properties of the material. This research was conducted to find out how the effect of PWHT holding time on SA-213 grade T91 and SA-213 grade T22 materials on the microstructure and hardness values. The results of the micro test show that the dominance of pearlite and martensite will decrease with increasing holding time, there is also a difference in microstructure grain size that will increase with increasing holding time which is associated with a decrease in value. The test results show that the hardness value will decrease with increasing holding time, especially in the weld metal area, getting the highest hardness value on the weld metal is in the specimen with a holding time of 15 minutes with a hardness value of 237.67 HVN and the lowest hardness value is in the specimen with holding time 45 minutes which is 201.1 HVN.

Keywords: Superheater, Holding Time, PWHT, Hardness, Micro structure.

1. PENDAHULUAN

Salah satu komponen boiler yang sangat penting adalah *superheater boiler*. Saat beroperasi komponen ini bekerja pada *temperature* dan tekanan yang tinggi. Oleh karena itu pemilihan material, *treatment material*, dan pengelasan harus diperhatikan. Material yang sering digunakan pada *superheater boiler* adalah material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22, karena material ini memiliki ketahanan yang baik pada *temperature* dan tekanan yang tinggi. Material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 merupakan baja paduan (*alloy steel*) dengan kandungan *Chromium*, *Molybdenum*, dan *Vanadium*. Merujuk pada ASME sec. II Part A ^[1] kandungan *Chromium*, *Molybdenum*, dan *Vanadium*. Komposisi unsur *Chromium*, *Molybdenum*, dan *Vanadium* material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 dapat dilihat pada Tabel 1.

Corresponding Author:
✉ Imam Khoirul Rohmat
Received on: 2022-07-18
Revised on: 2023-01-22
Accepted on: 2023-04-16

Tabel 1. Kandungan Cr-Mo-V 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%	-

Material yang digunakan pada penelitian ini memiliki diameter dan ketebalan yang berbeda. Material SA-213 grade T91 memiliki *outside* diameter 44.45 mm dan ketebalan 5.8 mm, sedangkan material SA-213 grade T22 memiliki *outside* diameter 50.8 mm dan ketebalan 10.6 mm. Akibat adanya perbedaan *outside* diameter dan ketebalan tersebut maka *inside* diameter kedua material juga berbeda, sehingga sebelum proses pengelasan pada material SA-213 grade T91 dilakukan proses *cold work* berupa proses *swaging* untuk menyamakan *inside* diameter kedua material. *Swaging* adalah salah satu jenis *cold work* pada fabrikasi yang bertujuan mengurangi diameter pipa menjadi lebih kecil atau sesuai dengan diameter yang diinginkan dengan cara penempaan atau menggunakan mesin, akibat dari adanya *cold work* adalah timbulnya tegangan sisa dan meningkatkan kekerasan pada material. Dengan adanya proses *swaging* pada material yang dilas akan meningkatkan nilai kekerasan. Pada penelitian *swaging* dilakukan untuk menyamakan *inside* diameter, Katavić, et al. ^[2].

Berdasarkan ASME B31.1 ^[3] proses pengelasan material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 wajib dilakukan *preheat* sebelum pengelasan dan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) setelah proses pengelasan, seperti pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Preheat Temperature material P-Number 5A dan 15E ^[3]

Base Metal P-Number	Base Metal Group	Greater Material Thickness		Additional Limits	Required Minimum Temperature	
		In.	mm		°F	°C
5A	Alloy Steel	All	All	SMTS ≤ 60 ksi (414 Mpa) SMTS > 60 ksi (414 Mpa)	300 400	150 205
15E	9Cr-1Mo-V CSEF Steel	All	All	None	400	205

Tabel 3. 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	- The mandatory preheat has been applied - Specified carbon content of the base metal ≤ 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	-	-

Setelah dilakukan pengelasan material mengalami perubahan kekuatan dan menimbulkan adanya tegangan sisa, untuk itu perlu dilakukan PWHT yang bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa dan menurunkan nilai kekerasan. Salah satu faktor krusial yang harus diperhatikan pada proses PWHT adalah *holding time*. *Holding time* adalah waktu penahanan saat proses PWT yang bertujuan untuk mendapatkan *temperature* pemanasan

yang homogen, struktur mikro yang homogen serta menurunkan nilai kekerasan. Oleh karena itu, parameter holding time harus diperhatikan karena bisa mempengaruhi struktur dan sifat mekanis 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*, Syukran, *et al.* ^[4]. Lamanya waktu *holding time* mengakibatkan nilai kekerasan akan menurun, kenaikan waktu *holding time* akan menyebabkan kekerasan mikro pada HAZ dan weld metal menurun, Arifah and Ruswanto ^[5].

Jika megacu pada WPS yang digunakan di lapangan, minimal *holding time* untuk kedua material ini adalah 15 menit. Sedangkan jika mengacu pada *standard American Society of Mechanical Engineers (ASME) minimal holding time material SA-213 grade T22* adalah 15 menit dan SA-213 grade T91 adalah 30 menit, sehingga jika mengacu pada *standard minimal holding time* pada material SA-213 grade T91 belum tercukupi. Apalagi pada material SA-213 grade T91 dilakukan proses *cold work* sebelum pengelasan. Berdasarkan latar belakang tersebut maka dilakukan penelitian mengenai pengaruh *holding time post weld heat treatment* pada material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 terhadap struktur mikro dan nilai kekerasan.

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap. Tahapan tersebut meliputi studi literatur dan studi lapangan, perumusan masalah dan penetapan tujuan penelitian, pengumpulan data, persiapan alat dan spesimen, *swaging*, *preheat* dan pengelasan, PWHT dengan variasi *holding time* 15 menit, 30 menit, dan 45 menit, pengujian *hardness vickers*, struktur mikro, analisa data dan pembahasan, kesimpulan dan saran.

2.1. Studi Literatur dan Studi Lapangan

Studi literatur dan studi lapangan meliputi pengumpulan serta pemahaman dari sumber referensi dan data yang akan dijadikan dasar untuk pelaksanaan penelitian dan menyelesaikan permasalahan yang ada. Referensi tersebut diambil dari *code*, *standard*, jurnal, modul, artikel, WPS, dan *mill certificate material*. Yang semua referensi tersebut berkaitan dengan topik yang diangkat pada penelitian ini antara lain PWHT, *holding time*, *hardness vickers test*, *preheat*, uji struktur mikro, dan spesifikasi mengenai material yang digunakan.

Studi lapangan dilakukan di *workshop* fabrikasi sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai dan didapatkan identifikasi suatu masalah mengenai *holding time* PWHT material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22.

2.2. Perumusan Masalah dan Penetapan Tujuan

Berdasarkan pemahaman dari studi literatur dan studi lapangan. Dengan permasalahan yang ada, maka dapat dirumuskan perumusan masalah dan manfaat dari penelitian ini bagi pihak-pihak terkait. Sehingga dapat dibuat dan diangkat menjadi judul dan obyek penelitian mengenai pengaruh *holding time* PWHT pada material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 beserta pengujian yang akan dilakukan.

2.3. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan sebagai penunjang pelaksanaan penelitian. Data yang dikumpulkan berupa data spesifik tentang material yang digunakan, *filler metal*, dan

parameter pengelasan yang akan digunakan pada penelitian ini. Pengumpulan data juga berupa dasar teori yang didapatkan dari *code*, *standard*, jurnal, artikel, *handbook*, WPS, serta *mill certificate* material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 yang digunakan sebagai data pendukung pada penelitian ini.

2.4. Persiapan Spesimen

Penelitian ini menggunakan material baja paduan (*alloy steel*) dengan spesifikasi SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22 dengan tipe sambungan *butt joint single V*. Proses pengelasan yang digunakan adalah *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) pada posisi 1G dan menggunakan *filler* metal ER 90S-B3. Masing-masing variasi diberikan notasi yang berbeda, yaitu :

- A1 dengan *holding time* 15 menit.
- A2 dengan *holding time* 30 menit.
- A3 dengan *holding time* 45 menit.

Mechanical properties dan komposisi kimia material SA-213 grade T91 dan material SA-213 grade T22 dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5, sedangkan *mechanical properties* dan komposisi kimia *filler metal* ER 90S-B3 dapat dilihat pada Tabel 6 dan 7.

Tabel 4. *Mechanical Properties material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22* ^[1]

Material	YIELD STRENGTH	TENSILE STRENGTH	HARDNESS VICKERS
	MPa	MPa	HV
SA-213 grade T91	569 – 611	697 – 711	210, Max 255
SA-213 grade T22	296	489	147, Max 162

Tabel 5. *Komposisi Kimia Material SA-213 grade T91* ^[1]

Material	CHEMICAL COMPOSITION (%)												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	V	Nb	Ti	N
SA-213 grade T91	0.11	0.34	0.48	0.001	0.002	8.29	0.86	0.28	0.007	0.21	0.075	0.002	0.53
SA-213 grade T22	0.05 – 0.15	0.5	0.30 – 0.60	0.025	0.025	1.9 – 2.60	0.87 – 1.13	-	-	-	-	-	-

Tabel 6. *Mechanical Properties Filler Metal ER 90S-B3* ^[6]

FILLER METAL	YIELD STRENGTH	TENSILE STRENGTH
	MPa	MPa
ER 90S-B3	549	620

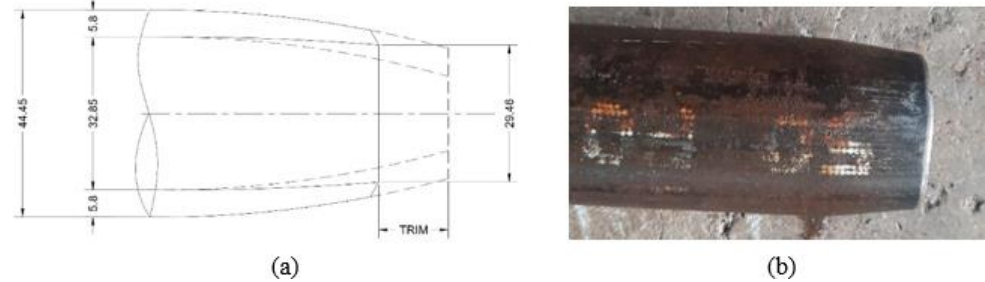
Tabel 7. *Komposisi Kimia Filler Metal ER 90S-B3* ^[6]

CHEMICAL COMPOSITION (%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0.07–0.12	0.40–0.70	0.40–0.70	0.025	0.025	2.30–2.70	0.90–1.20	0.20

2.5. Swaging

Adanya perbedaan diameter pipa maka dilakukan proses *Swaging*. Dimana proses ini adalah salah satu bentuk *cold work* yang banyak dijumpai pada proses fabrikasi yang bertujuan untuk memperkecil diameter pipa dengan penempaan atau penekanan menggunakan mesin. Pada penelitian ini, *swaging* dilakukan pada material SA-213 grade T91 yang memiliki

outside diameter 44.45 mm dan ketebalan 5.8 mm yang akan dilakukan proses *swaging* sehingga memiliki *inside* diameter yang sama dengan material SA-213 grade T22. Desain *swaging* pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



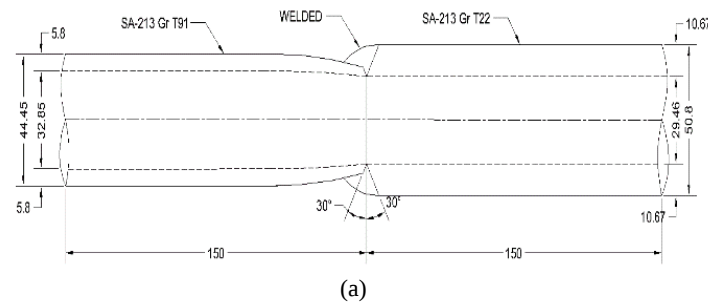
Gambar 1. (a) Desain *Swaging*; (b) Hasil *Swaging* Material SA-213 Grade T91

2.6. Proses Preheat dan Pengelasan

Sebelum dilaksanakan proses pengelasan, material dilakukan proses *preheat* terlebih dahulu pada masing-masing spesimen. 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. *Temperature preheat* pada masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. *Temperature Preheat* Pada Masing-Masing Spesimen ^[3]

SPESIMEN	TEMPERATURE PREHEAT
Holding time 15 menit	212°C
Holding time 30 menit	214°C
Holding time 45 menit	206°C



Gambar 2: (a) Desain Sambungan Pengelasan, (b) Hasil Pengelasan

Setelah proses *preheat* dilakukan, maka dilanjutkan dengan proses pengelasan pada masing-masing spesimen. Proses pengelasan menggunakan *filler metal* ER 90S-B3 dengan proses pengelasan *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)* pada posisi 1G. Proses pengelasan

menggunakan *backing* gas dan *shielding* gas Argon 99.98% dengan *flow rate* 15 ℓ/min . Material yang digunakan pada penelitian ini adalah SA-213 grade T22 dengan diameter 50.8 mm dan SA-213 grade T91 dengan diameter 44.45 mm, pada material SA-213 grade T91 telah mengalami pengurangan diameter dengan proses *swaging*. Desain Sambungan dapat dilihat pada Gambar 2.

2.7. Proses PWHT

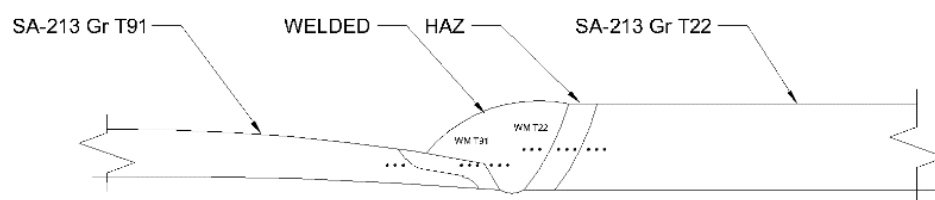
Setelah semua spesimen dilakukan proses pengelasan, maka material dapat dilakukan proses PWHT. Penelitian ini berfokus pada variasi *holding time* pada PWHT dengan menggunakan variasi *holding time* 15 menit, 30 menit, dan 45 menit. Proses PWHT bertujuan untuk mendapatkan struktur mikro yang sama atau homogen dan untuk menurunkan nilai kekerasan. Nilai kekerasan pada *weld metal* T91 akan menurun seiring dengan bertambahnya waktu *holding time*, Yang, *et al.* ^[7]. Semua material mendapatkan perlakuan yang sama pada saat proses PWHT. Mengacu pada ASME Section I ^[8] dan ASME Section VIII Division 1 ^[9] UCS 56, 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.

2.8. Pengujian Struktur Mikro

Pengujian struktur mikro pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui ada atau tidaknya perubahan struktur mikro antara yang mengalami PWHT dengan variasi *holding time*. Pengujian *metallography* bertujuan untuk mengetahui kondisi struktur serta arah perubahan struktur mikro, Purnomo, *et al.* ^[10]. Semakin lama waktu *holding time* maka ukuran butir akan semakin besar karena adanya cukup waktu untuk butiran berkembang, Wibowo, *et al.* ^[11]. Sebelum proses pengujian, material terlebih dahulu dilakukan proses *grinding* dan *polishing* untuk menghaluskan permukaan material, jika permukaan material sudah halus kemudian material dilakukan proses etsa menggunakan larutan nital 2% dengan komposisi 2 ml HNO_3 dan 98 Alkohol. Perbesaran pada pengujian struktur mikro yang digunakan adalah 500X dengan menggunakan mikroskop optik. Pengambilan titik pengujian struktur mikro dilakukan pada daerah *base metal*, HAZ, *fusion line*, serta *weld metal* SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22.

2.9. 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 *holding time* PWHT pada material SA-213 grade T91 dan SA-213 grade T22. *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 yang terletak pada 3 titik pada *base metal* SA-213 grade T91, 3 titik pada HAZ SA-213 grade T91, 3 titik pada *weld metal* SA-213 grade T91, 3 titik pada *weld metal* SA-213 grade T22, 3 titik pada HAZ SA-213 grade T22, dan 3 titik pada *base metal* SA-213 grade T22. 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.

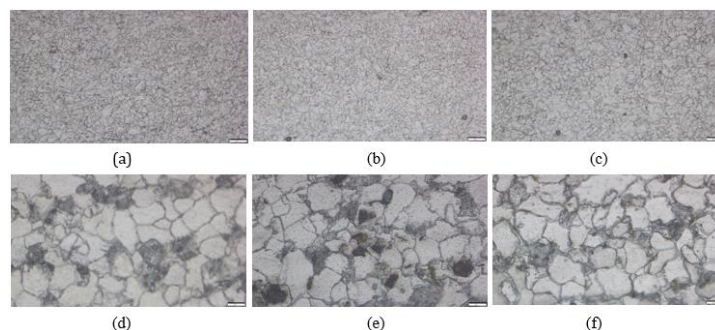


Gambar 3. Titik Pengujian *Hardness*

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Pengujian Struktur Mikro

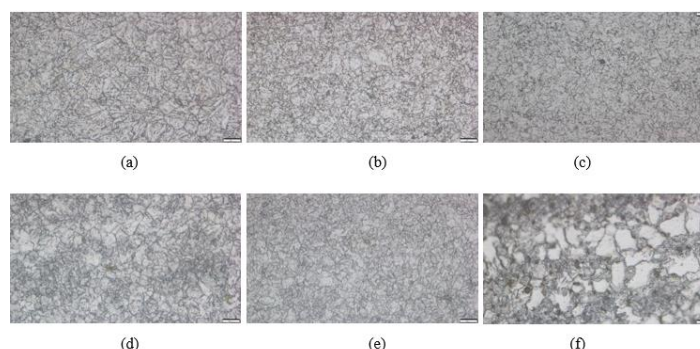
Pengujian struktur mikro pada penelitian ini dilakukan pada daerah *base metal*, HAZ, *fusion line*, dan *weld metal* pada masing-masing variasi. Hasil pengujian struktur mikro pada masing-masing daerah adalah sebagai berikut :



Gambar 4. Struktur Mikro Pada *Base Metal*: (a) SA-213 T91 Holding Time 15 Menit; (b) SA-213 T91 Holding Time 30 Menit; (c) SA-213 T91 Holding Time 45 Menit; (d) SA-213 T22 Holding Time 15 Menit; (e) SA-213 T22 Holding Time 30 Menit; (f) SA-213 T22 Holding Time 45 Menit.

Gambar 4 di atas menunjukkan struktur mikro pada daerah *base metal*. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa fasa yang terbentuk adalah *ferrite* dengan warna terang, *pearlite* dengan warna gelap, dan *martensite* yang berbentuk menyerupai jarum atau plat. Dapat diketahui bahwa semakin lama waktu holding time, fasa *ferrite* semakin mendominasi daripada fasa yang lain. 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 *martensite* berbentuk seperti jarum atau plat, bentuknya tergantung dari suhu transformasinya. Fasa *martensite* terbentuk pada baja paduan karena adanya penambahan unsur paduan, sehingga *ferrite* akan berubah menjadi *martensite* yang tergantung dari suhu transformasi dan laju pendinginannya, Kou^[12]. Dapat diketahui bahwa ukuran butir akan semakin besar seiring dengan lama waktu holding time, hal tersebut dikarenakan 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. Dengan demikian dapat diketahui bahwa nilai kekerasan tertinggi pada *base metal* dengan *holding time* 15 menit dikarenakan adanya fasa *martensite* dan ukuran butir yang kecil serta rapat, dengan adanya proses PWHT dan penambahan waktu holding time akan menurunkan nilai kekerasan pada material karena ukuran butir akan berkembang serta fasa akhir yang berubah. Silva, *et al.*^[13] menyatakan bahwa nilai kekerasan tertinggi ada pada material tanpa perlakuan *heat treatment* karena adanya fasa *martensite* yang belum ditemper sehingga menjadikan material keras dan rapuh,

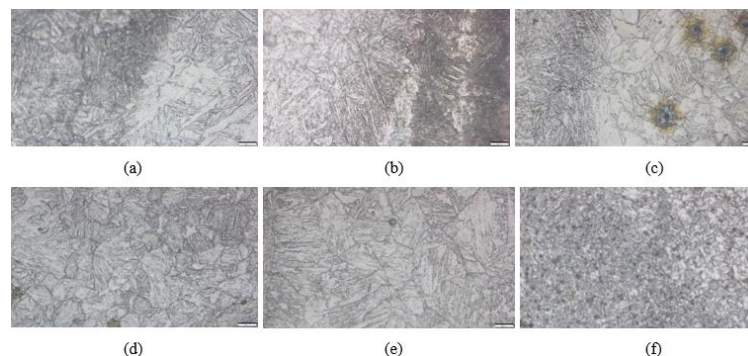
adanya proses PWHT terbukti akan menurunkan kekerasan pada material dengan adanya perubahan struktur akhir pada material.



Gambar 5. Struktur Mikro Pada HAZ: (a) SA-213 T91 *Holding Time* 15 Menit; (b) SA-213 T91 *Holding Time* 30 Menit; (c) SA-213 T91 *Holding Time* 45 Menit; (d) SA-213 T22 *Holding Time* 15 Menit; (e) SA-213 T22 *Holding Time* 30 Menit; (f) SA-213 T22 *Holding Time* 45 Menit.

Gambar 5 memperlihatkan struktur mikro daerah HAZ, dimana daerah HAZ pada material SA-213 grade T91 lebih banyak fasa *martensite* daripada daerah base metalnya, ini karena selama proses pengelasan daerah HAZ mengalami pemanasan atau kenaikan *temperature* yang lebih tinggi daripada daerah *base metal* dengan laju pendinginan yang cepat, tapi ada perbaikan struktur *martensite* setelah dilakukan PWHT. Struktur *martensite* ini terbentuk karena adanya perlakuan PWHT dari fasa *austenite* dengan pendinginan yang cepat, karena pendinginan terjadi dengan laju pendinginan yang tinggi maka tidak ada cukup waktu untuk karbon berdifusi keluar dari struktur kristal untuk membentuk *cementite*, Mithun, *et al.*^[14].

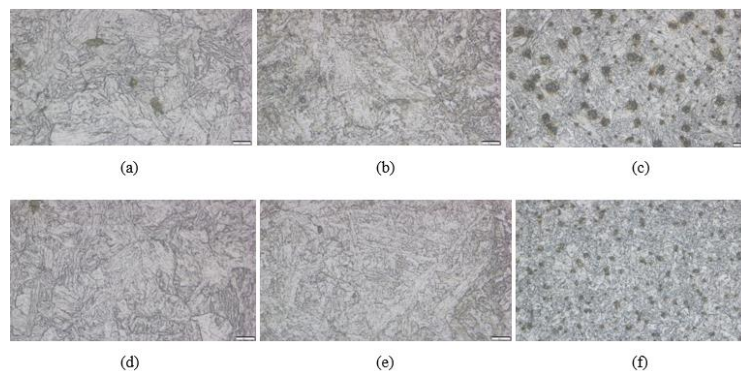
Dari Gambar 5 juga menunjukkan adanya pengurangan *prosentase pearlite* dan *martensite*, semakin lama waktu *holding time* *prosentase ferrite* akan meningkat sedangkan *prosentase pearlite* dan *martensite* akan menurun, ini menandakan semakin lama waktu *holding time* maka nilai kekerasan pada material juga akan menurun karena fasa *pearlite* lebih keras daripada fasa *ferrite*. Fasa *pearlite* pada baja paduan terdiri dari *ferrite* dan Fe_3C , *ferrite* menunjukkan warna terang dan Fe_3C menunjukkan warna gelap. Fasa *pearlite* pada baja paduan terdiri dari lapisan atau lamellae dua fasa yang berselang-seling yaitu *ferrite* dan Fe_3C yang terbentuk secara bersamaan selama transformasi. *Cementite* jauh lebih keras daripada *ferrite*, dengan demikian peningkatan fraksi Fe_3C dalam *alloy steel* sambil menekan struktur lainnya secara konstan akan menghasilkan material yang lebih keras, Callister^[15].



Gambar 6. Struktur Mikro Pada *Fusion Line*: (a) SA-213 T91 *Holding Time* 15 Menit; (b) SA-213 T91 *Holding Time* 30 Menit; (c) SA-213 T91 *Holding Time* 45 Menit; (d) SA-213 T22 *Holding Time* 15 Menit; (e) SA-213 T22 *Holding Time* 30 Menit; (f) SA-213 T22 *Holding Time* 45 Menit.

Gambar 6 menunjukkan struktur mikro area *fusion line*. Gambar 6 menunjukkan adanya pengurangan *prosentase pearlite* dan *martensite*, semakin lama waktu *holding time* *prosentase ferrite* akan meningkat dan *prosentase pearlite* dan *martensite* akan menurun, ini menandakan semakin lama waktu *holding time* maka nilai kekerasan pada material juga akan menurun karena fasa *pearlite* dan *martensite* lebih keras daripada fasa *ferrite*. Terdapat fasa *martensite* pada hasil pengujian struktur mikro yang telah dilakukan, ini terjadi karena PWHT dilakukan pada *temperature* di atas A1 yaitu pada *temperature* 750°C. Selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Li, *et al.* ^[16] menyatakan jika *temperature* PWHT di atas *temperature* A1 sekitar 723°C fasa *austenite* akan mulai terbentuk dan pada saat *cooling* atau pendinginan maka akan membentuk fasa *martensite*. Dari berbagai fasa mikro struktur yang ada atau yang diperoleh dari hasil transformasi, *martensite* adalah fasa yang paling keras, paling kuat, tapi paling rapuh. *Martensite* terbentuk ketika *alloy steel* didinginkan dengan laju pendinginan yang relatif cepat ke *temperature* yang relatif rendah. *Martensite* adalah struktur fasa tunggal dan tidak seimbang yang dihasilkan dari transformasi *austenite* tanpa adanya difusi, dalam pembentukannya *martensite* bersaing dengan *bainite* dan *pearlite*, transformasi *martensite* terjadi ketika laju pendinginan cukup cepat untuk mencegah difusi karbon. Merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Dey, *et al.* ^[17] menyatakan bahwa struktur mikro pada daerah HAZ menunjukkan adanya endapan halus yang terbentuk selama perlakuan panas, struktur mikro yang ada pada HAZ menunjukkan *martensite* yang lebih halus daripada daerah *base metal*.

Semakin lama waktu *holding time*, maka ukuran butir akan membesar karena adanya waktu yang cukup untuk butiran berkembang, dengan ukuran butir yang semakin besar maka nilai kekerasan pada material juga akan menurun. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Wibowo, *et al.* ^[11] 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 butiran berkembang.



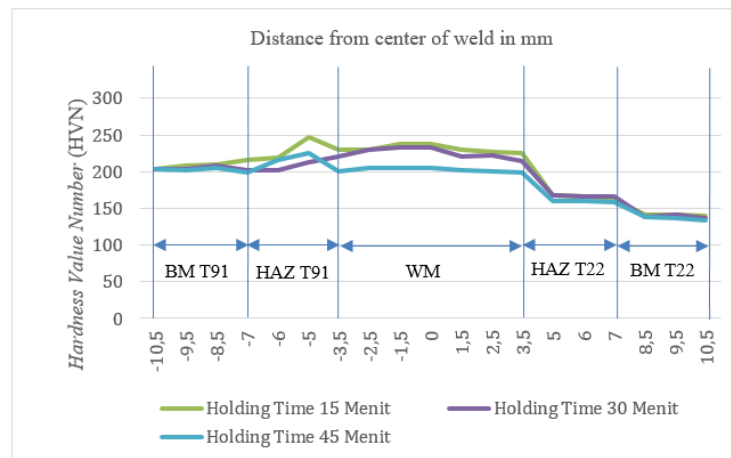
Gambar 7. Struktur Mikro Pada Weld Metal: (a) SA-213 T91 Holding Time 15 Menit; (b) SA-213 T91 Holding Time 30 Menit; (c) SA-213 T91 Holding Time 45 Menit; (d) SA-213 T22 Holding Time 15 Menit; (e) SA-213 T22 Holding Time 30 Menit; (f) SA-213 T22 Holding Time 45 Menit.

Gambar 7 menunjukkan struktur mikro weld metal material SA-213 *grade* T91 dan SA-213 *grade* T22 pada masing-masing variasi. Dari berbagai fasa mikro struktur yang ada atau yang diperoleh dari hasil transformasi, *martensite* adalah fasa yang paling keras, paling kuat, tapi paling rapuh. *Martensite* terbentuk ketika *alloy steel* didinginkan dengan laju pendinginan yang relatif cepat ke *temperature* yang relatif rendah. *Martensite* adalah struktur fasa tunggal dan tidak seimbang yang dihasilkan dari transformasi *austenite* tanpa adanya difusi, dalam pembentukannya *martensite* bersaing dengan *bainite* dan *pearlite*, transformasi *martensite* terjadi ketika laju pendinginan cukup cepat untuk mencegah difusi karbon. 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 *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, Mithun, *et al.* ^[14]. Hal ini juga selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Li, *et al.* ^[16] menyatakan bahwa pembentukan *martensite* dan temper *martensite* terjadi ketika material PWHT didinginkan di udara bebas dengan laju pendinginan yang cepat sehingga dengan pembentukan *martensite* akan berakibat pada kekerasan material, tapi dengan 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 dengan variasi *holding time*.

3.2. HASIL PENGUJIAN KEKERASAN

Hardness test dilakukan pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal* dengan total titik pengujian *hardness* sebanyak 18 titik pada masing-masing spesimen yang terletak pada 3 titik pada *base metal* SA-213 grade T91, 3 titik pada HAZ SA-213 grade T91, 3 titik pada *weld metal* SA-213 grade T91, 3 titik pada *weld metal* SA-213 grade T22, 3 titik pada HAZ SA-213 grade T22, dan 3 titik pada *base metal* SA-213 grade T22. Jarak indentasi pertama pada masing-masing daerah adalah 1.5 mm dan jarak antar indentasi adalah 1 mm. Adapun hasil pengujian *hardness* Vickers pada masing-masing variasi dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 8. Nilai Kekerasan Masing-Masing Variasi Dari Center Weld

Gambar 8 menunjukkan nilai kekerasan dari masing-masing spesimen pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal*. Dari Gambar 8 terlihat adanya penurunan nilai kekerasan antara material PWHT dengan variasi holding time, khususnya pada daerah *weld metal* dan HAZ. 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 dengan *holding time* 15 menit 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 panas, Bhaskara Sardi, *et al.* ^[18]. Pernyataan tersebut sesuai dengan hasil pengujian kekerasan yang telah dilakukan, hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan waktu *holding time* nilai kekerasan akan menurun. Hal ini selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Sharma, *et al.* ^[19] *holding time* pada temperature yang sama akan menurunkan nilai kekerasan pada material hal ini dapat dikaitkan dengan perbaikan sifat mekanis, rekristalisasi, dan pertumbuhan butir pada *temperature* yang sama dengan *holding time* yang digunakan. 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, Paristiawan, *et al.* ^[20].

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. 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*, Ari ^[21].

4. KESIMPULAN

Dari analisa data dan pembahasan mengenai pengaruh *holding time* PWHT dengan variasi *holding time* 15 menit, 30 menit, dan 45 menit. Dapat disimpulkan bahwa :

1. Hasil pengujian struktur mikro menunjukkan bahwa semakin lama waktu *holding time* dapat mempengaruhi struktur mikro pada material. Semakin lama waktu *holding time* akan menyebabkan dominasi *pearlite* dan *martensite* menurun, struktur mikro akhir pada material akan lebih didominasi *ferrite*. Terdapat juga perbedaan mengenai ukuran butir struktur mikro, semakin lama waktu *holding time* akan menyebabkan ukuran butir lebih besar karena tersedia cukup waktu untuk butiran berkembang.
2. Hasil pengujian kekerasan menunjukkan bahwa *holding time* berpengaruh terhadap penurunan nilai kekerasan, semakin lama waktu *holding time* maka nilai kekerasan akan semakin menurun. Khususnya pada weld metal, didapatkan nilai kekerasan tertinggi pada weld metal SA-213 grade T91 ada pada spesimen dengan *holding time* 15 menit yaitu sebesar 237.67 HVN dan nilai terendah ada pada spesimen dengan *holding time* 45 menit yaitu sebesar 201.1 HVN, sedangkan pada weld metal SA-213 grade T22 nilai kekerasan tertinggi ada pada spesimen dengan *holding time* 15 menit yaitu sebesar 226.03 HVN dan nilai terendah ada pada spesimen dengan *holding time* 45 menit yaitu sebesar 198.52 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), pp. 319–331. doi:10.2298/SOS0803319K. 2008.
- [3] ASME B31.1., "Power Piping - ASME Code for Pressure Piping, B31.1", 1. 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: Jurnal ..., 14(June 2020), pp. 46–51. Available at: <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/sintek/article/view/6242>. 2020.
- [5] ARIFAH, A. and RUSWANTO, S., "*Efek Post Weld Heat Treatment terhadap Sifat Mekanik AISI 316 Hasil Pengelasan GTAW*", Jurnal Mekanik Terapan, 1(2), pp. 81–87. doi:10.32722/jmt.v1i2.3354. 2020.
- [6] ASME Section II Part C., "*Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals*". 2021
- [7] YANG, D.X., YANG, L. and HUANG, A.G., "*The Effect of Holding Time under Heat Treatment on the Properties of T92 Steel Welding Joint*", *Advanced Materials Research*, 1079–1080(December 2014), pp. 7–12. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1079-1080.7. 2014.
- [8] ASME Section I., "ASME Section I 2021". 2021
- [9] ASME Section VIII Division 1., "*ASME Boilers and Pressure Vessel Code*", ASME Section VIII Division 1, p. 717. 2019
- [10] 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), pp. 49–58. Available at: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval/article/view/22886>. 2019.
- [11] WIBOWO, A. et al., "*Pengaruh Holding Time Annealing terhadap Perubahan Mikrostruktur Baja Struktur S690QL dan S235JR*", Jurnal Integrasi, 13(1), pp. 46–52. doi:10.30871/ji.v13i1.2881. 2021.
- [12] KOU, "*Welding metallurgy, The Welding of Aluminium and its Alloys*". doi:10.1533/9781855737631.10. 2002.
- [13] SILVA, F.J.G. et al., "*Evaluation of welded joints in P91 steel under different heat-treatment conditions*", *Metals*, 10(1). doi:10.3390/met10010099. 2020.
- [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), pp. 42–50. doi:10.14456/jmmm.2019.17. 2019.
- [15] CALLISTER, W.D., "*Materials science and engineering: An introduction (2nd edition)*", *Materials & Design*, 12(1), p. 59. doi:10.1016/0261-3069(91)90101-9. 1991.
- [16] 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), pp. 80–87. 2013.
- [17] 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), pp. 389–395. doi:10.1007/s40194-014-0124-0. 2014.
- [18] BHASKARA SARDI, V., JOKOSISWORO, S. and YUDO, H., "*JURNAL TEKNIK PERKAPALAN 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), p. 142. Available at: <http://ejournal3.undip.ac.id/index.php/naval>. 2018.

- [19] SHARMA, A., KANT VERMA, D. and KUMARAN, S., "*Effect of post weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of Hot Wire GTA welded joints of SA213 T91 steel*", *Materials Today: Proceedings*, 5(2), pp. 8049–8056. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.490. 2018.
- [20] PARISTIAWAN, P.A. et al., "Pengaruh Variasi Media Pendingin Dan Variasi *Holding Time* Pada Proses Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Pada Baja Mangan Fe-10.5 Mn-1.3Mo-2.5Ni", *Jurnal Rekayasa Mesin*, (March), pp. 573–580. 2021.
- [21] 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), p. 395. doi:10.35314/ip.v9i2.1175. 2019.