

Penyusunan Kurva *Distance Amplitude Correction* (DAC) pada Material A335 Grade P92 Akibat Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan pada Proses *Post Weld Heat Treatment*

Eriek Wahyu Restu Widodo*, Moh. Thoriq Wahyudi, Abiyyuda Putra Farrasy, M. Karim Al Amin,
Dika Anggara, Imah Luluk Kusminah

Program Studi D4 Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya,
Jalan Teknik Kimia Kampus ITS, Sukolilo, Kota Surabaya, 60111

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

Diajukan: 04-12-2024; Diterima: 12-12-2024; Diterbitkan: 21-12-2024

Abstrak

A335 P92 merupakan baja tahan panas martensitik yang banyak diaplikasikan pada komponen *power plant* dengan tekanan tinggi, sehingga dibutuhkan ketebalan tinggi. Sifat mertensitik ini memiliki kekerasan tinggi dan mudah retak yang menyebabkan pengelasan pada A335 P92 harus dilakukan PWHT. Pada material dengan ketebalan tinggi, pengujian *Ultrasonic Test* menjadi pengujian yang direkomendasikan karena lebih efisien dibandingkan dengan *Radiography Test* yang membutuhkan *exposure time* cukup lama. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan pada proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap intensitas suara pada kurva *Distance Amplitude Correction* (DAC), metalografi, dan nilai kekerasan. Nilai kekerasan tertinggi pada spesimen dengan temperatur PWHT 705°C dan waktu tahan PWHT 60 menit yaitu 302.85 kgf/mm², sedangkan nilai kekerasan terendah pada spesimen dengan temperatur PWHT 775°C dan waktu tahan PWHT 120 menit yaitu 285.13 kgf/mm². Berdasarkan kurva DAC diperoleh nilai intensitas suara pada spesimen dengan temperatur 705°C dan waktu tahan PWHT 60 menit yaitu 45 dB, sedangkan pada spesimen dengan temperatur 775°C dan waktu tahan PWHT 120 menit yaitu 62.5 dB. Berdasarkan data yang diperoleh di atas, dapat disimpulkan bahwa kenaikan temperatur dan waktu tahan PWHT berbanding lurus dengan kenaikan intensitas suara yang dihasilkan.

Kata kunci: kurva DAC; PWHT; temperatur; waktu tahan

Abstract

A335 P92 is a martensitic heat-resistant steel that is widely applied to power plant components with high pressure, so it requires high thickness. The nature of this martensite has high hardness and is easy to crack which causes welding on A335 P92 to be carried out PWHT. On materials with high thickness, *Ultrasonic Test* is the recommended test because it is more efficient than *Radiography Test* which requires a fairly long exposure time. This study conducted to evaluate the effect of temperature variations and holding time in the *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) process on sound intensity on the *Distance Amplitude Correction* (DAC) curve, metallography, and hardness values. The highest hardness value in the specimen with a PWHT temperature of 705°C and a PWHT holding time of 60 minutes is 302.85 kgf/mm², while the lowest hardness value in the specimen with a PWHT temperature of 775°C and a PWHT holding time of 120 minutes is 285.13 kgf/mm². Based on the DAC curve, the sound intensity value in the specimen with a temperature of 705°C and a PWHT holding time of 60 minutes is 45 dB, while in the specimen with a temperature of 775°C and a PWHT holding time of 120 minutes it is 62.5 dB. Based on the data obtained above, it can be concluded that the increase in temperature and PWHT holding time is directly proportional to the increase in the sound intensity produced.

Keywords: DAC curve; PWHT; temperature, holding time

1. Pendahuluan

Material A335 grade P92 merupakan material baja martensitik yang mengandung *chromium* dan *molibdenum* serta ditambahkan *vanadium* dan *niobium*, serta kandungan nitrogennya diatur dengan baik. Struktur mikro material A335 grade P92 dalam kondisi mentah terdiri dari martensitik yang baru terbentuk. Sifat mertensitik ini memiliki kekuatan yang rendah, mudah retak, serta dapat terkorosi tegangan. Selain itu karakter martensitik yang baru terbentuk ini tidak diketahui kekuatan tarik mulurnya, maka dapat diasumsikan keberadaannya tidak menguntungkan. ASME Sec 1 menyatakan bahwa material A335 P92 yang merupakan P-Number 15E dan *mandatory* di lakukan PWHT [1].

Post-weld heat treatment (PWHT) merupakan suatu proses perlakuan panas setelah pengelasan untuk menghilangkan *residual stress* dan merestrukturisasi mikrostruktur yang telah diubah oleh panas pengelasan (*Controlling Heat Treatment of Welded P91*) [2]. Proses perlakuan panas setelah pengelasan (PWHT) ini dilakukan untuk mengurangi resiko patah getas dengan mengurangi tingkat tegangan sisa [3]. Kebutuhan suatu material terhadap PWHT bergantung pada ketangguhan patah pada suhu layanan minimum, tingkat tegangan dan ukuran cacat yang mungkin ada [4]. Material A335 *grade* P92 merupakan material yang biasa diaplikasikan pada komponen *power plant* yang mana membutuhkan tekanan tinggi, oleh karena itu dibutuhkan material dengan ketebalan tinggi. Pengujian yang direkomendasikan untuk material dengan ketebalan tinggi adalah pengujian *Ultrasonic Test*, hal ini dikarenakan lebih efisien dibandingkan dengan *Radiography Test* yang membutuhkan *exposure time* cukup lama [5] [6].

Ultrasonik adalah teknik pemeriksaan yang serbaguna, dipakai untuk menguji bermacam-macam produk logam dan nonlogam seperti sambungan las, benda tempa, benda cor, lembaran tipis, tabung, plastik, dan keramik. Ultrasonik memiliki keunggulan dapat mendeteksi diskontinuitas bawah permukaan dengan akses hanya dari satu sisi specimen [7]. Tujuan pengujian ultrasonik adalah untuk memastikan keandalan produk dengan cara memperoleh informasi yang berhubungan dengan diskontinuitas; mengungkap sifat diskontinuitas tanpa mengganggu kegunaan benda; dan memisahkan material yang diterima dan ditolak dengan mengacu pada *standard* yang telah ditetapkan [8] [9].

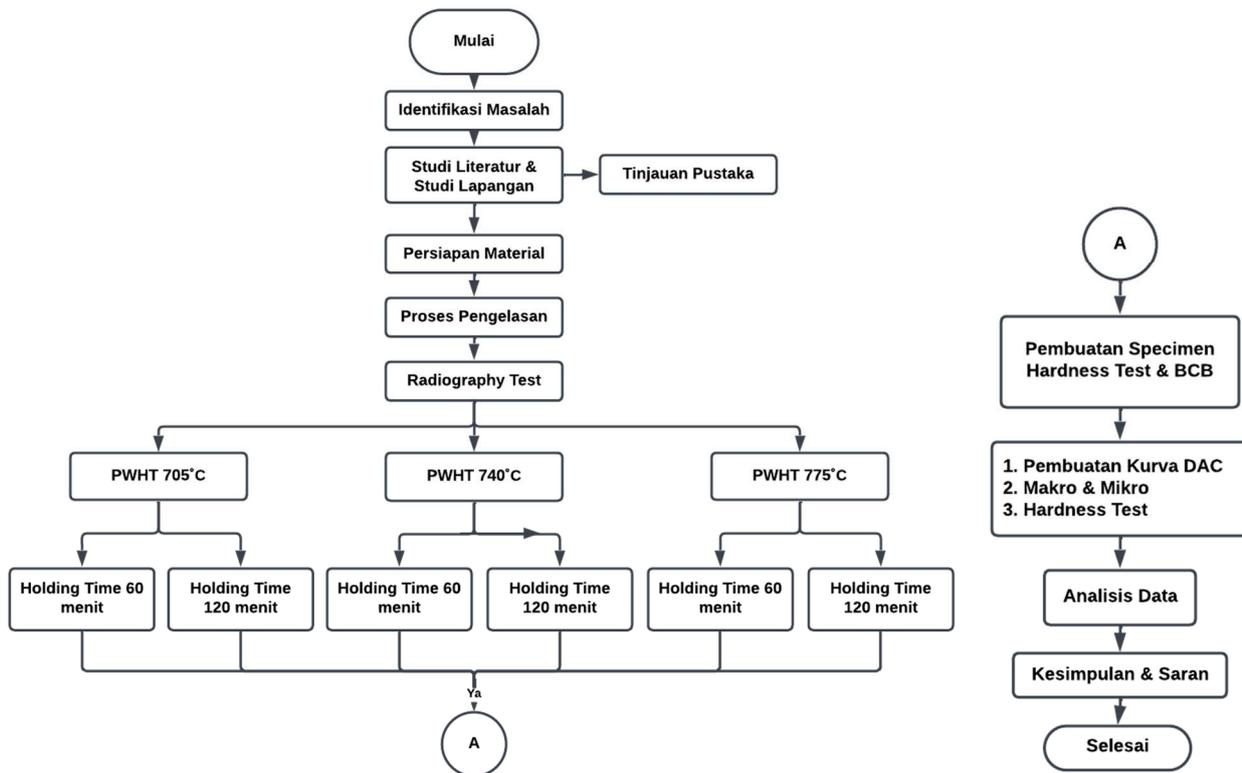
Material dengan kekuatan tinggi, seperti baja tahan panas, memiliki sifat yang berbeda dengan material kekuatan rendah. Sifat-sifat ini dapat mempengaruhi hasil pengelasan, sehingga diperlukan perlakuan khusus untuk mendapatkan hasil yang baik. Perlakuan khusus tersebut meliputi pemanasan awal (*preheat*), temperatur *interpass*, dan parameter las [5] [10]. Berdasarkan permasalahan tersebut, dilakukan penelitian lebih lanjut dengan melakukan variasi temperatur dan waktu tahan untuk mengetahui nilai kekerasan dan intensitas suara pada kurva DAC menggunakan material A335 *grade* P92 [11].

Pembuatan kurva DAC yang mana memerlukan BCB (Basic Calibration) yang identik terpengaruh karena perlakuan panas yang diterima. Oleh karena itu cacat buatan dibuat pada weld metal sebagai perwakilan material yang akan diuji setelah menerima perlakuan panas. Setelah kurva DAC dibuat diharapkan sensitivitas alarm diatur pada amplitudo indikasi cacat. Penelitian ini berfokus pada pengaruh yang terjadi karena PWHT yang diterima material alloy P92 terhadap pembuatan kurva DAC dan nilai kekerasannya. Pembuatan DAC bertujuan untuk membantu mengevaluasi produk yang terkena pengerjaan dingin dan perlakuan panas yang direkomendasikan oleh ASME Section V. Gelombang suara yang melewati benda uji dipengaruhi oleh kerapatan atau densitas, sehingga setelah DAC dibuat dapat diaplikasikan pada benda yang sebenarnya.

2. Material dan Metodologi

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah material A335 *grade* P92, material yang termasuk dalam *alloy steel pipe* dan sering digunakan dalam *high temperature service*. Oleh karena itu pada material SA-335 P92 banyak diaplikasikan pada *pressure part boiler*, material ini termasuk dalam P No. 15E dan memiliki elongasi dan kuat tarik yang cukup baik. Material SA-335 P92 memiliki kadar *chromium* (Cr) yang cukup tinggi dan juga kandungan lainnya, unsur ini yang berfungsi sebagai pengurang korosi pada material tersebut. Kawat las yang digunakan dalam penelitian ini adalah E9015 B9 yang merupakan kawat las untuk pengelasan SMAW yang mempunyai kandungan kromium dan *molybdenum*, tidak sensitif terhadap karat pada logam dasar. Kawat las ini paling sering digunakan untuk pengelasan SMAW dengan polaritas AC atau DC pada material A335 *grade* P92.

Proses las yang digunakan adalah *Shield Metal Arc Welding* dengan sambungan *V-groove butt joint* posisi pengelasan 1G, sebelum dilakukan proses pengelasan perlu dilakukan proses *preheat* dikarenakan material A335 grade P92 *mandatory* atau wajib diberlakukan proses pemanasan awal sebelum dilakukannya proses pengelasan mengacu pada ASME B31.3 *Temperature preheat* yang digunakan pada material A335 grade P92 sebesar 205°C. *Post Weld Heat Treatment* menurut ASME bahwa material dengan P-No 15E tidak ada pengecualian ketebalan untuk proses *Post Weld Heat Treatment* [12]. Penelitian ini divariasikan temperature dan waktu tahan PWHT yaitu pada temperatur 705°C, 740°C dan 775°C dengan waktu tahannya masing-masing adalah 60 menit dan 120 menit dan prosesnya dilakukan di dalam *furnace*, kemudian proses pendinginan dilakan di udara bebas. Selanjutnya dilakukan pengujian material meliputi metalografi, pengujian kekerasan, dan ultrasonik, setelah itu dilakukan pembuatan kurva *Distance Amplitude Correction* (DAC). Langkah-langkah yang dilakukan guna menyelesaikan penelitian ini ditunjukkan oleh diagram alir penelitian pada Gambar 1.

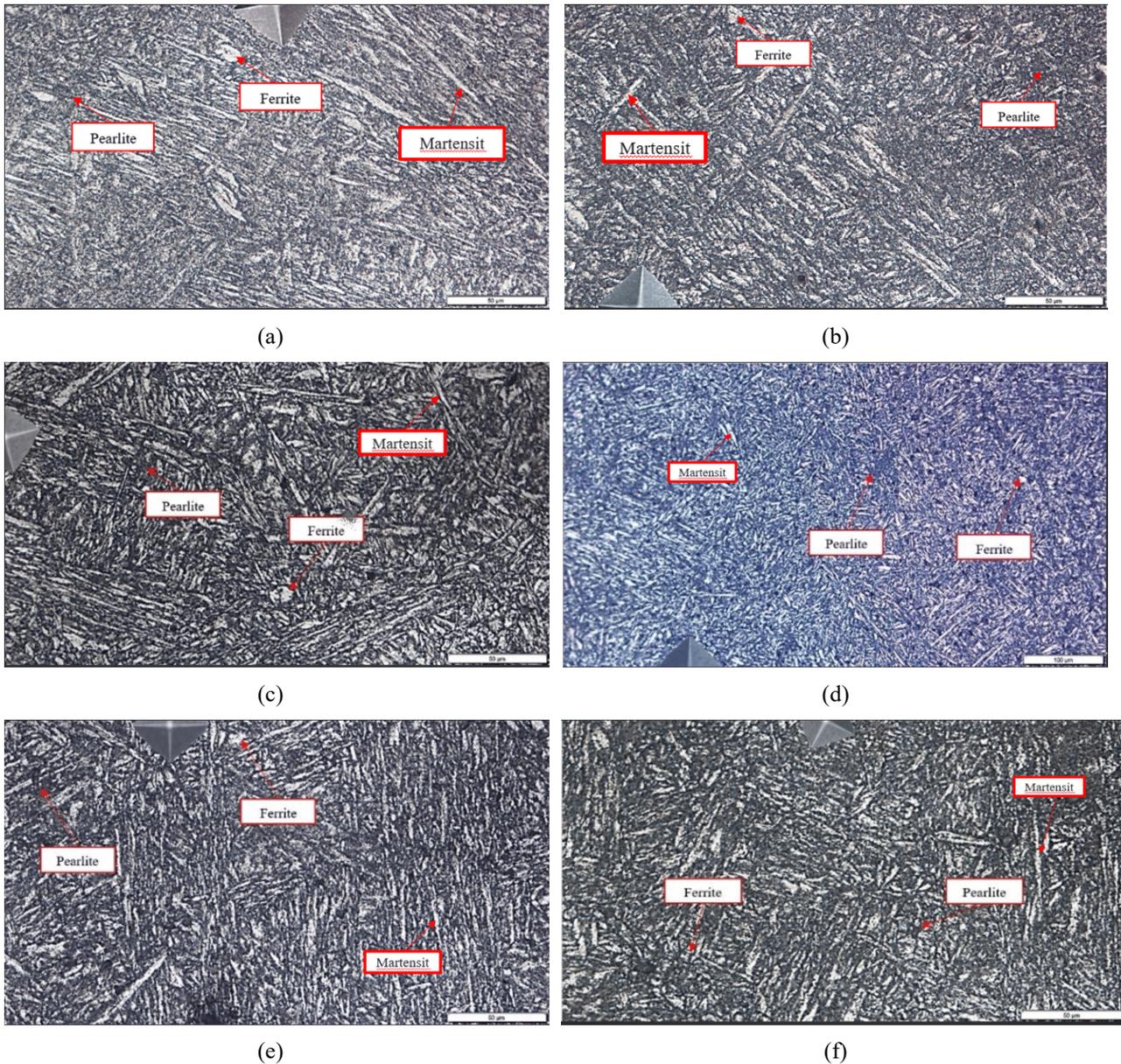


Gambar 1. Diagram alir penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian spesimen yang dilakukan pada penelitian ini meliputi metalografi (strukturmikro), pengujian kekerasan, ultrasonik, dan pembuatan kurva *Distance Amplitude Correction* (DAC). Strukturmikro dilakukan dengan tujuan untuk mengamati fasa yang terbentuk dalam proses pengelasan dengan variasi temperatur dan waktu tahan PWHT pada hasil lasan bagian melintang yang terbebas dari cacat. Pengamatan strukturmikro ini dilakukan pada logam induk, *Heat Affected Zone* (HAZ), dan logam lasan. Sebelum proses pengujian strukturmikro pada penelitian kali ini dilakukan, Langkah pertama adalah dilakukan proses *etching* dengan mengaplikasikan larutan *nital* dengan komposisinya terdiri dari 98% alkohol dan 2% HNO₃. Larutan *nital* ini sendiri dipilih karena larutan yang paling cocok dan sesuai digunakan untuk proses *etching* pada material baja karbon adalah larutan *nital*. Hasil pengamatan mikrostruktur pada spesimen di daerah logam induk dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan hasil pengamatan dari strukturmikro pada seluruh variasi spesimen

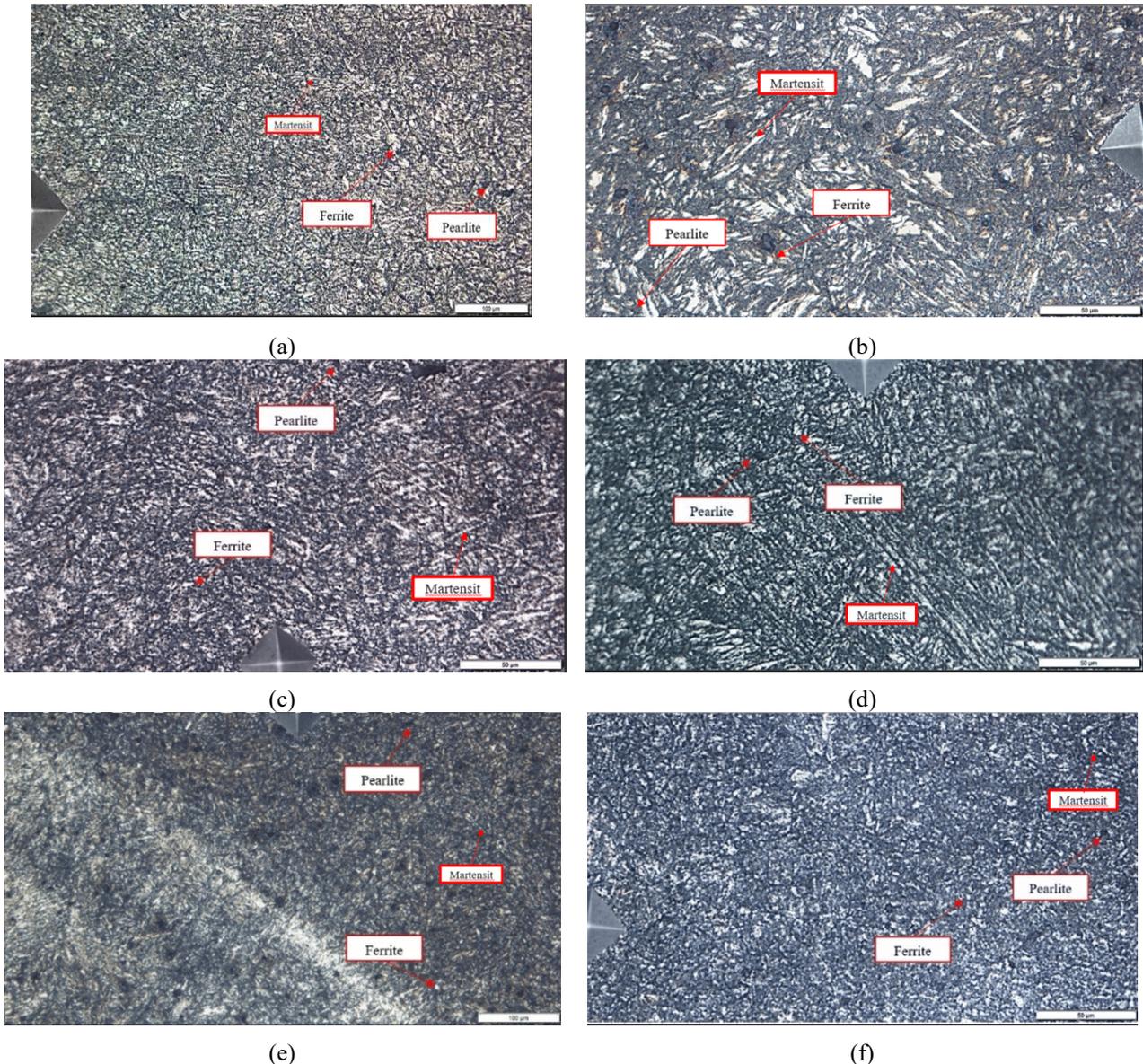
uji penelitian ini, tampak terbentuknya fase *ferrite*, *pearlite*, dan *martensite* yang mana secara teori bahwa ketiga fase tersebut yang terbentuk dari spesimen uji pada peneliatan ini adalah fase-fase pembentuk sifat mekanik kekerasan yang tinggi. Bahkan berdasarkan gambar hasil pengujian strukturmikro tersebut pada ketiga daerah yang diamati seluruhnya terbentuk ketiga fase yang telah disebutkan di atas. Tampak pada Gambar 2 tersebut yang mana semakin tinggi temperature PWHT dan semakin lama waktu tahan yang diberikan, maka ukuran butir yang terbentuk semakin besar dan jarak antar butir yang ada semakin renggang.



Gambar 2. Strukturmikro spesimen lasan material A335 grade P92 pada daerah logam induk dengan variasi temperatur dan waktu tahan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) (a) 705°C dan 60 menit; (b) 705°C dan 120 menit; (c) 740°C dan 60 menit; (d) 740°C dan 120 menit; (e) 775°C dan 60 menit; dan (f) 775°C dan 120 menit

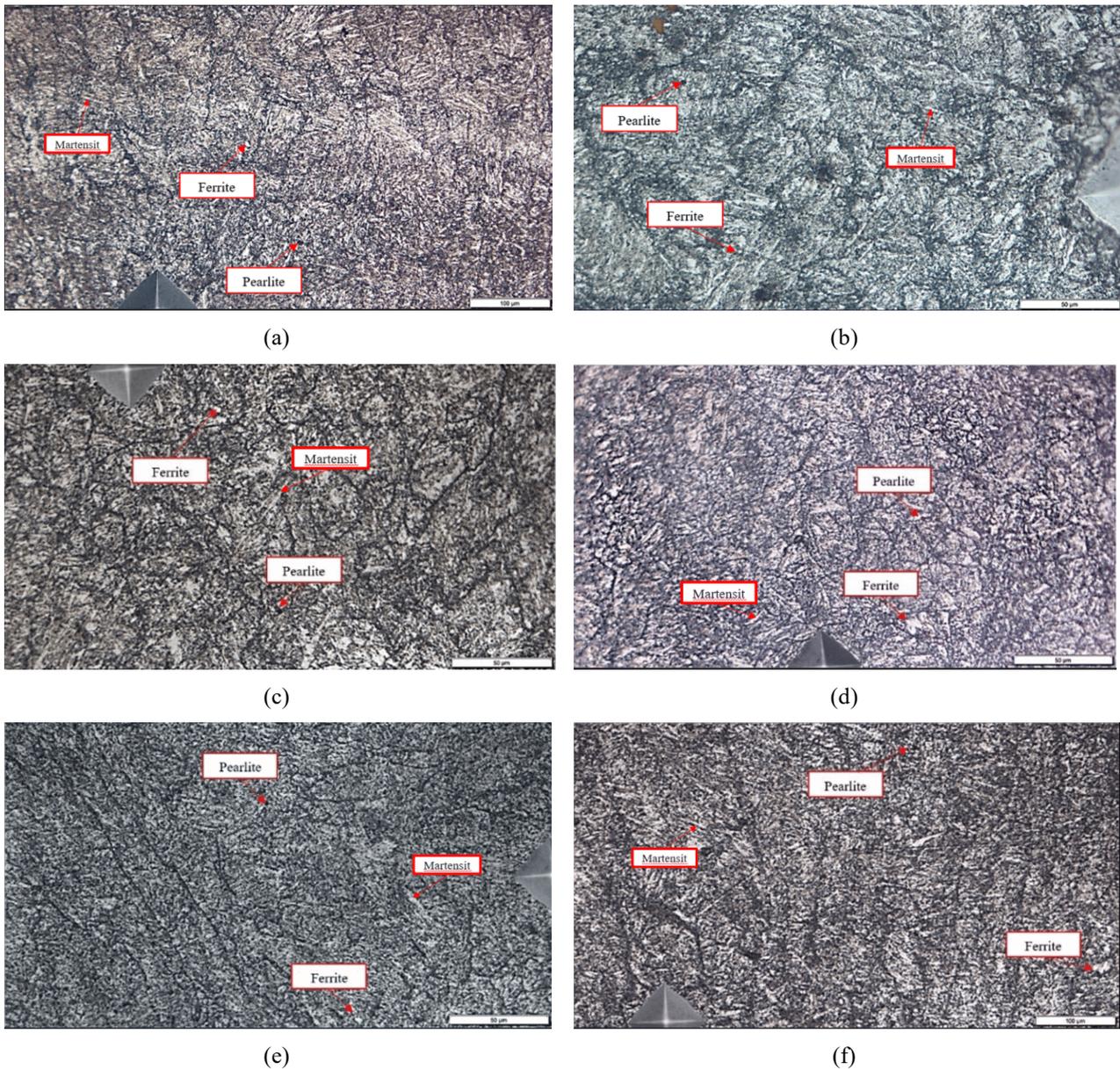
Struktur mikro dari spesimen hasil pengelasan pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) dengan variasi temperatur dan waktu tahan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan Gambar 3 tersebut tampak dari strukturmikro bahwa fase yang terbentuk terdiri dari *ferrite*, *pearlite*, dan *martensite*. Sedangkan jika diamati terkait

ukuran butirnya dapat dilihat bahwa semakin rendah temperatur PWHT dan semakin singkat waktu tahan yang diberikan bagi spesimen logam induk tersebut dihasilkan ukuran butir yang semakin kecil dan jarak antar butir yang semakin rapat.



Gambar 3. Strukturmikro spesimen lasan material A335 grade P92 pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) dengan variasi temperatur dan waktu tahan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) (a) 705°C dan 60 menit; (b) 705°C dan 120 menit; (c) 740°C dan 60 menit; (d) 740°C dan 120 menit; (e) 775°C dan 60 menit; dan (f) 775°C dan 120 menit

Struktur mikro dari spesimen hasil pengelasan pada daerah logam lasan dengan variasi temperatur dan waktu tahan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) dapat dilihat pada Gambar 4. Jika diperhatikan strukturmikro pada daerah *Heat Affected Zone* (HAZ), ukuran butir untuk spesimen dengan temperatur PWHT yang semakin tinggi dan waktu tahannya yang semakin lama menjadi semakin lebar dan jarang antar butir yang terbentuk semakin reggang. Fasa yang muncul di daerah HAZ juga sama seperti pada daerah logam induk dan lasan yaitu *ferrite*, *pearlite*, dan *martensite*, yang mana diketahui bahwa ketiga fasa tersebut adalah fase pembentuk sifat mekanik dalam hal ini adalah kekerasan yang tinggi. Untuk sebaran ketiga fase tersebut juga diperoleh wilayah sebaran yang merata dan tidak berkumpul pada satu titik saja. Fase-fase yang terbentuk tersebut merupakan hasil dari proses PWHT dengan memvariasikan temperatur dan waktu tahannya.



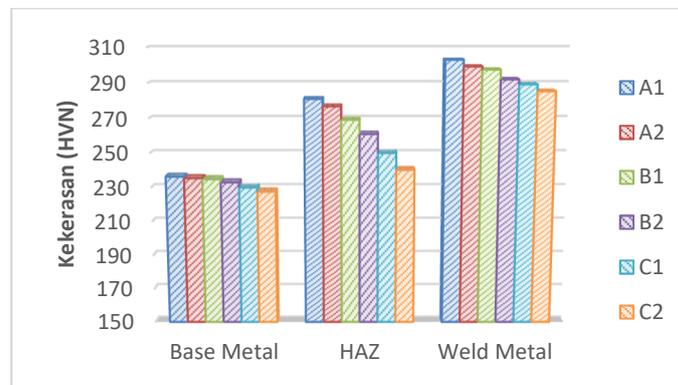
Gambar 4. Strukturmikro spesimen lasan material A335 grade P92 pada daerah logam lasan dengan variasi temperatur dan waktu tahan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) (a) 705°C dan 60 menit; (b) 705°C dan 120 menit; (c) 740°C dan 60 menit; (d) 740°C dan 120 menit; (e) 775°C dan 60 menit; dan (f) 775°C dan 120 menit

Berdasarkan hasil strukturmikro pada daerah logam induk, HAZ, dan logam lasan dengan masing-masing variasi temperatur dan waktu tahan proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT), material A335 grade P92 pada dasarnya memiliki nilai kekerasan yang cukup tinggi hal ini dikarenakan komponen penyusunnya adalah *ferritic martensitic* dapat dilihat bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa *ferrite*, *pearlite*, dan *martensite*. Fasa *ferrite* dengan warna terang dan fasa *pearlite* dengan warna gelap, sedangkan untuk fasa *martensite* ditandai dengan bentuk menyerupai jarum. Fasa yang terbentuk dari hasil uji mikro setelah dilakukan proses PWHT selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh [13], dimana setelah mengalami proses PWHT fasa yang terbentuk pada material A335 grade P92 menguatkan bukti adanya butiran halus dengan struktur martensit temper. Sehubungan dengan kondisi *as-welded*, presipitasi karbida yang menonjol diamati di tepi butir bersama dengan penurunan nilai kekerasan yang nyata. Hal ini terkait erat dengan efek *tempering* tambahan pada struktur martensitik akibat proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT).

Fasa *pearlite* pada baja paduan terdiri dari ferrite dan Fe_3C , ferrite ditunjukkan warna terang dan Fe_3C ditunjukkan warna gelap. Fasa *pearlite* pada baja paduan terdiri dari lapisan atau lamellar dua fasa yang berselang-seling yaitu *ferrite* dan Fe_3C yang terbentuk secara bersamaan selama transformasi. Sedangkan fasa Ferrite terbentuk pada *hypoeutectoid* adalah *ferrite proeutectoid* dan *ferrite eutectoid*. *Ferrite proeutectoid* terbentuk sebelum terjadinya reaksi *eutectoid* pada suhu di bawah A_1 , sedangkan *ferrite eutectoid* adalah *ferrite* yang terdapat dalam *pearlite* [7].

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 [14]. *Martensite* terbentuk pada baja paduan karena penambahan unsur paduan, yang menyebabkan *ferrite* berubah menjadi *martensite* bergantung pada transformasi suhu serta laju pendinginannya.

Nilai kekerasan spesimen yang terbentuk dari proses pengelasan material A335 *grade* P92, seperti yang terlihat pada Gambar 5.



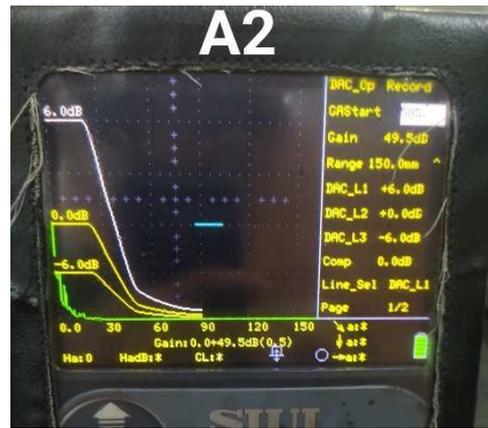
Gambar 5. Grafik hasil pengujian kekerasan

Gambar 5 merupakan hasil pengujian kekerasan dari spesimen lasan pada daerah logam induk, HAZ, dan logam lasan yang mana pada daerah logam induk diperoleh nilai kekerasan terendah jika dibandingkan dengan daerah HAZ dan logam lasan. Nilai kekerasan pada semua daerah pengelasan tidak kurang dari 210 kgf/mm^2 , yang mana masih memenuhi syarat keberterimaan material A335 *grade* P92. Temperatur dan waktu tahan pada proses PWHT sangat berpengaruh pada nilai kekerasan, semakin tinggi *temperature* dan semakin lama waktu tahan yang digunakan menjadikan nilai kekerasan pada *base metal*, HAZ maupun logam lasan yang semakin rendah. Hal ini berhubungan dengan hasil strukturmikro yaitu dengan adanya kenaikan temperatur dan waktu tahan dalam proses PWHT, pada proses PWHT menyebabkan ukuran butir semakin besar dan semakin renggang. Dengan membesarnya ukuran butir menyebabkan kekerasan semakin menurun. Mengenai pengaruh *heat treatment* pada material *grade* P92 menyatakan bahwa nilai kekerasan tertinggi ada pada material tanpa perlakuan *heat treatment* karena adanya fase *martensite* yang belum ditemper sehingga menjadikan material keras dan rapuh, adanya proses PWHT terbukti akan menurunkan nilai kekerasan pada material dengan adanya perubahan struktur akhir pada material antara material *non heat treatment* dan material yang mengalami *heat treatment*.

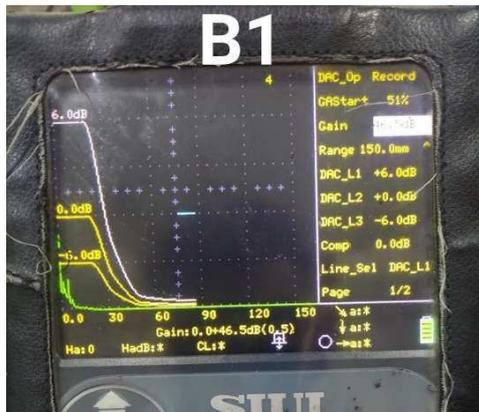
Hasil pembuatan kurva *Distance Amplitude Corection* (DAC) dengan spesimen yang digunakan adalah spesimen pengelasan dengan variasi temperatur dan waktu tahan proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) dapat dilihat pada Gambar 6.



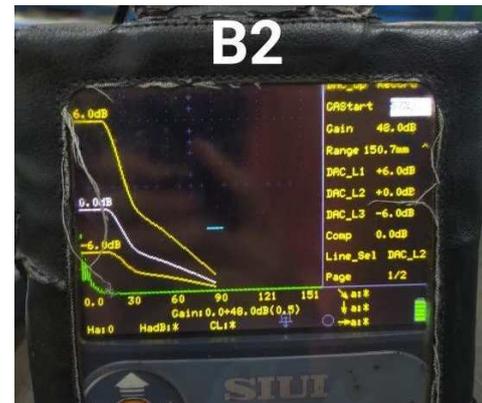
(a)



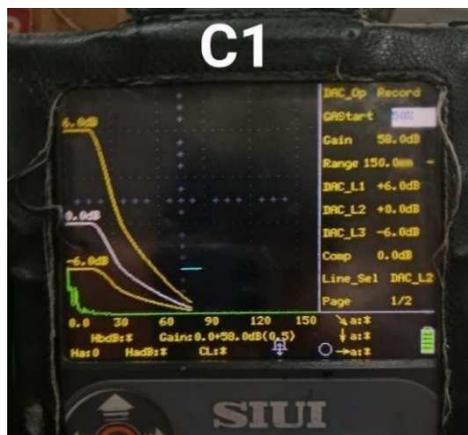
(b)



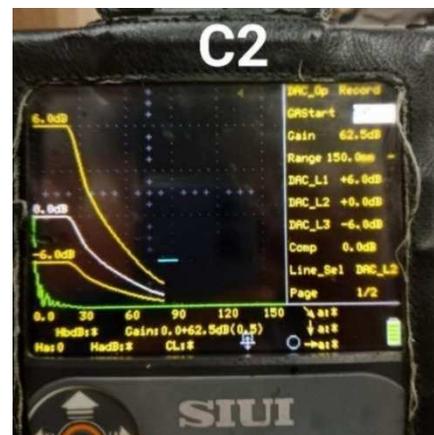
(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar 6. Kurva *Distance Amplitude Corection* (DAC) spesimen lasan material A335 grade P92 pada daerah logam lasan dengan variasi temperatur dan waktu tahan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) (a) 705°C & 60 menit; (b) 705°C & 120 menit; (c) 740°C & 60 menit; (d) 740°C & 120 menit; (e) 775°C & 60 menit; & (f) 775°C & 120 menit

Berdasarkan hasil pengujian ultrasonik untuk menentukan kurva *Distance Amplitude Corection* (DAC) spesimen lasan material A335 grade P92 pada daerah logam lasan dengan variasi temperatur dan waktu tahan *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) diperoleh analisis dari pembuatan kurva DAC pada penelitian ini jika semakin tinggi dan *holding time* semakin lama maka membuat level penguatan suara menurun. Pada hasil pembuatan kuva DAC hasil dari pengaruh temperatur dan waktu tahan yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel Intensitas Suara *Distance Amplitude Corection* (DAC) spesimen lasan material A335 grade P92

No. Spesimen	Temperatur (°C)	Waktu Tahan (menit)	Intensitas Suara (dB)
A1	705	60	45
A2		120	49.5
B1	740	60	46.5
B2		120	48
C1	775	60	58
C2		120	62.5

Berdasarkan Tabel 1, dapat dilihat perbedaan temperatur dan lamanya waktu tahan pada setiap spesimen mengalami kenaikan nilai dB yang yang tidak jauh berbeda hal ini dikarenakan masukan panas yang diterima oleh material saat proses PWHT yang dijadikan variasi masih dalam batas. Lamanya waktu tahan juga mempengaruhi terjadinya perbesaran butir dan jarak antar butir lebih renggang, hal tersebut yang mengakibatkan terjadinya pelemahan gelombang suara. Semakin tinggi temperatur dan waktu tahan PWHT akan menghasilkan nilai dB yang semakin tinggi, begitupun sebaliknya semakin rendah temperatur dan waktu tahan PWHT akan menghasilkan nilai dB yang semakin rendah.

Kenaikan temperatur dan waktu tahan dalam proses PWHT mengakibatkan perbesaran ukuran butir dan tidak homogenya butiran yang mana menjadi penyebab terjadinya pelemahan (*atenuasi*) intensitas suara yang dihasilkan, oleh karena itu pada material yang memiliki nilai kekerasan rendah akan membutuhkan penguatan intensitas suara yang lebih untuk melintasi material. Spesimen yang mengalami waktu tahan 60 menit lebih rapat dibandingkan dengan spesimen yang mengalami waktu tahan 120 menit. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin lama *holding time* pada PWHT ukuran butir akan semakin besar dikarenakan adanya cukup waktu bagi butiran untuk berkembang, dengan ukuran butir yang semakin besar seiring dengan bertambahnya waktu *holding time* maka nilai kekerasan pada material akan menurun. [15]

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan PWHT pada material A335 grade P92 terhadap hasil uji metalografi adalah semakin tinggi temperatur dan semakin lama waktu tahan PWHT maka semakin besar ukuran butir dan semakin renggang jarak antar butiran. Hal ini juga berlaku sebaliknya jika semakin rendah temperatur dan lama waktu tahan PWHT maka semakin kecil ukuran butir dan semakin rapat jarak antar butiran. Pengaruh variasi temperatur dan waktu tahan PWHT pada material A335 grade P92 terhadap intensitas suara pada indikasi pembuatan kurva DAC adalah semakin besar nilai kekerasan pada A335 grade P92 maka semakin kecil nilai intensitas suara yang dibutuhkan untuk mencapai 80%FSH (*Full Screen High*), dan berlaku sebaliknya. Hal ini dibuktikan dengan variasi pada temperatur 705°C dan *holding time* 60 menit menghasilkan besar intensitas suara (45 dB). Sedangkan dengan variasi pada temperatur 775°C dan *holding time* 120 menit menghasilkan besar intensitas suara (62.5 dB).

Ucapan terima kasih

Ucapan terimakasih kepada P3M PPNS atas Dana DIPA yang diberikan sehingga penelitian ini dapat diselesaikan tepat waktu.

Daftar Pustaka

- [1] S. Caminada, G. Cumino, and A. Lauro, "Experiences in the use of advanced materials for Ultra Super Critical thermoelectric power plants: ASTM P92 grade and its weldability," *Weld. Int.*, vol. 26, no. 12, pp. 910–920, Dec.

2012, doi: 10.1080/09507116.2011.592702.

- [2] I. Rohmat and W. Winarto, "EFEK GETARAN PADA PENGELASAN ALUMINUM 5083 H112 MENGGUNAKAN PROSES LAS GAS METAL ARC WELDING (GMAW) TERHADAP POROSITAS," *JTT (Jurnal Teknol. Ter.*, vol. 4, p. 85, Oct. 2018, doi: 10.31884/jtt.v4i2.126.
- [3] I. K. Rohmat, M. S. Amri, M. M. Munir, H. B. Kurniyanto, and M. H. Muzzakki, "Analisis Holding Time Post Weld Heat Treatment (Pwht) Pada Pengelasan Material Sa-213 Grade T91 Dengan Sa-213 Grade T22 Untuk Aplikasi Boiler," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 1, pp. 317–329, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i1.1304.
- [4] Y. Tkach, I. Hadley, V. S. Wright, and F. M. Burdekin, "A Review of Postweld Heat Treatment Code," *Weld. J.*, pp. 63–69.
- [5] H. B. Kurniyanto and D. H. Pratama, "Mechanical Properties of Repair Welding High Yield Strength Structural Steel S690Q (Sifat Mekanik Sambungan Las Hasil Repair Baja Struktur High Yield Strength S690Q)," *J. Renew. Energy Mech.*, vol. 05, no. 01, pp. 2714–621X, 2022, doi: 10.25299/rem.2022.vol5(01).8782.
- [6] N. D. Aprilia and M. Luthfi, "Rancang Bangun Blok Kalibrasi Non-Piping untuk Mendapatkan Perbandingan Kurva DAC dengan Blok Kalibrasi Piping pada Metode Pengujian Ultrasonik," *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 13, no. 01, pp. 874–879, 2022.
- [7] M. M. Munir, ST., M. M. Thoriq Wahyudi, ST., M. Hendri Budi Kurniyanto, S.ST., and M. Dika Anggara, S.ST., *Modul Praktik DT NDT*, no. April. 2019.
- [8] L.-X. Song and G. Q. Li, "Processing and cooling effects on post-fire mechanical properties of high strength structural steels," *Fire Saf. J.*, vol. 122, p. 103346, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103346.
- [9] X. Qiang, F. Bijlaard, and H. Kolstein, "Dependence of mechanical properties of high strength steel S690 on elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 30, pp. 73–79, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.018>.
- [10] A. Arifah and S. Ruswanto, "Efek Post Weld Heat Treatment terhadap Sifat Mekanik AISI 316 Hasil Pengelasan GTAW," *J. Mek. Terap.*, vol. 1, no. 2 SE-Articles, pp. 81–87, Nov. 2020, doi: 10.32722/jmt.v1i2.3354.
- [11] ASME, *Boiler and pressure vessel codes*, vol. 64, no. 240. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2019.
- [12] ASME, "ASME B31.1-2007 Power Piping ASME Code for Pressure Piping, B31," vol. 1, 2007.
- [13] R. P. Verma and M. Kumar Lila, "A short review on aluminium alloys and welding in structural applications," *Mater. Today Proc.*, vol. 46, pp. 10687–10691, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.447>.
- [14] 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 (Basel)*, vol. 10, no. 1, 2020, doi: 10.3390/met10010099.
- [15] A. Wibowo, H. Widiastuti, N. L. Arifin, and N. P. Aryanto, "Pengaruh Holding Time Annealing terhadap Perubahan Mikrostruktur Baja Struktur S690QL dan S235JR," *J. Integr.*, vol. 13, no. 1, pp. 46–52, 2021, doi: 10.30871/ji.v13i1.2881.