**ANALISIS KEGAGALAN PEMBENTUKAN *ELLIPSOIDAL HEAD PRESSURE VESSEL*
DARI DUA PELAT DILAS ASME SA516 GRADE 70N DENGAN MENGGUNAKAN
METODE FABRIKASI *COLD FORMING***

***FAILURE ANALYSIS OF ELLIPSOIDAL HEAD PRESSURE VESSEL FORMING FROM
TWO ASME SA516 GRADE 70N WELDED PLATES USING COLD FORMING
FABRICATION METHOD***

Khairmen Suardi¹, Faris Fadli²

¹PT Exatra Enjinerig, Jakarta 12430

²Jurusan Teknik Metalurgi dan Material, Universitas Indonesia, Depok 16424

E-mail : khairmen.suardi@exatra.co.id

Abstrak

Head pada *pressure vessel* yang berbentuk melengkung, seperti: *hemispherical*, *torispherical*, dan *ellipsoidal* dapat dibuat dari pelat dengan lebar 2.5 m yang mengalami proses *metal forming*. Namun, pelat yang tersedia di pasaran pada umumnya memiliki lebar 1,6 m. Kondisi ini menjadi batasan apabila ingin menggunakan satu material pelat secara integral sehingga dibutuhkan pelat untuk membuat head dengan lebar yang lebih besar. Oleh karena itu, untuk membuat *head* dengan lebar 2,5 m dilakukan proses *cold forming* pada dua pelat yang dilas. Namun setelah proses dilakukan, terjadi kegagalan berupa timbulnya retakan di sekitar area las. Pada paper ini akan dibahas analisis kegagalan proses *cold forming* yang terjadi pada dua pelat ASME SA516 grade 70N yang digunakan sebagai *base metal*. Untuk menganalisis penyebab kegagalan, maka dilakukan pengujian kekerasan, tarik, metalografi, dan komposisi kimia. Selain itu juga dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai *crack consists of hot* (UCS), *cold cracking* (P_{cm}), dan *carbon equivalent* (CE). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa material tersebut memiliki nilai UCS di bawah 30, nilai P_{cm} berada di antara 0,23-0,35%, serta berada di zona II pada diagram Graville dimana nilai tersebut menunjukkan bahwa material memiliki kemampuan yang baik. Sementara dari hasil pengujian mekanis didapatkan nilai kekerasan dan kekuatan tarik yang lebih besar dari standar, yaitu masing-masing sebesar 300 HBW dan 621 Mpa dengan nilai elongasi yang masih tinggi, yaitu sebesar 21,8%. Hasil pengamatan metalografi menunjukkan terbentuk fase martensit namun dalam jumlah yang sedikit pada area *heat affected zone* (HAZ) dengan bentuk butir seperti jarum. Fase martensit ini berperan sebagai *stress concentration* yang menjadi titik awal retak ketika proses *cold forming* dilakukan. Terbentuknya fase martensit ini disebabkan oleh proses *preheat* yang tidak sesuai serta *heat input* yang terlalu besar.

Kata Kunci: *Ellipsoidal Head, Pressure Vessel, ASME SA516 grade 70N, Cold Forming*

Abstract

The head on a pressure vessel with curved shapes such as hemispherical, torispherical, and ellipsoidal is derived from the formed plate. Generally the plates available in the market have a width of 1.6 m, this condition becomes a limitation if you want to use one plate material integrally so that a plate is

needed to make a head with a larger width. Therefore, to make a head with a width of 2.5 m, a cold forming process is carried out on two welded plates. However, after the process is carried out, failure occurs in the form of cracks around the weld area. In this paper, we will discuss the failure analysis of the cold forming process that occurred on two ASME SA516 grade 70N plates used as base metal. In order to analyze the causes of failure, hardness, tensile, metallographic, and chemical composition tests were carried out. In addition, calculations were also carried out to determine the value of crack consists of hot (UCS), cold cracking (Pcm), and carbon equivalent (CE). From the calculation results it is evident that the material has a UCS value below 30, the PCm value is between 0.23-0.35%, and is in zone II on the Graville diagram where this value indicates that the material has good weldability. Meanwhile, from the results of mechanical testing, the hardness and tensile strength values are greater than the standard, which are 300 HBW and 621 Mpa, respectively, with a high elongation value, which is 21.8%. The results of metallographic observations showed that the martensite phase was formed but in small amounts in the heat affected zone (HAZ) area with needle-like grain shapes. This martensite phase acts as a stress concentration which is the starting point for cracks when the cold forming process is carried out. The formation of the martensite phase is caused by an inappropriate preheat process and the heat input is too large.

Keywords : *Ellipsoidal Head, Pressure Vessel, SA516 Gr. 70N, Cold Forming*

PENDAHULUAN

Pressure vessel merupakan elemen penting yang digunakan dalam berbagai industri, khususnya: migas, petrokimia, pembangkit listrik, *general* industri, dan lain-lain. Secara umum berdasarkan bentuknya *pressure vessel* dibagi menjadi dua, yaitu *spherical* dan silinder. *Pressure vessel* yang didesain secara silinder memiliki biaya fabrikasi yang lebih murah, namun kemampuan menahan tekanannya tidak sebaik *pressure vessel spherical*. Metode fabrikasi *pressure vessel* termasuk *head* sudah diatur dalam standar ASME VIII divisi I dan II. Pada ASME VIII divisi II diterapkan standar-standar yang lebih tinggi sehingga dapat diaplikasikan pada kondisi tekanan yang lebih besar. Untuk mendesain suatu *pressure vessel* dibutuhkan beberapa data seperti fungsi vessel, kondisi operasi (suhu dan tekanan), bahan konstruksi, dimensi dan orientasi, jenis *head* yang akan digunakan, persyaratan pemanasan/pendinginan, persyaratan agitasi, dan spesifikasi perlengkapan internal (Raghavaiah 2020).

Head pada *pressure vessel* silinder berperan penting dalam mendistribusikan tekanan pada *pressure vessel* silinder. Hal itu membuat desain *head* menjadi sangat penting diperhitungkan. *Head* dengan bentuk melengkung memiliki kekuatan yang lebih baik, namun memiliki keterbatasan penggunaan karena sifat

penyambungan yang permanen dan metode fabrikasi yang lebih sulit. *Head* dibagi ke beberapa jenis, yaitu: *hemispherical*, *torispherical*, dan *ellipsoidal* (Moss dan Basic 2017). Adapun *head* dengan bentuk yang tidak melengkung, misalnya: *toriconical* dan *flat*.

Namun ada beberapa masalah yang tidak dapat diselesaikan secara spesifik oleh kode dan standar, khususnya keterbatasan ukuran bahan baku pelat di pasaran. Umumnya pelat dijual dengan lebar sebesar 1,6 m. Hal ini kemudian menjadi tantangan untuk membuat *head pressure vessel* dengan lebar lebih dari 1,6 m. Berdasarkan hal ini dilakukan pengujian berupa pembuatan *head pressure vessel* dengan bentuk *ellipsoidal* dari gabungan dua pelat yang dilas. Pelat tersebut kemudian dilakukan perlakuan panas berupa *stress relief* setelah pengelasan dan perubahan bentuk di suhu ruang (*cold forming*). Setelah dilakukan *cold forming* material mengalami kegagalan berupa timbulnya retakan di sekitar area *base material heat affected zone* (HAZ). Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui penyebab awal dan mekanisme terjadinya kegagalan tersebut.

Analisis terjadinya kegagalan pada *head pressure vessel* dengan berdasarkan uji kekerasan, uji tarik, uji metalografi, dan uji komposisi. Dan dapat memberikan saran agar kesalahan tidak terjadi kembali pada pembentukan *head pressure vessel* dengan ukuran lebih dari 1,6 m.

Gambar 1. Retakan pada Pelat SA516 Gr. 70N setelah cold forming

Tabel 1. Komposisi kimia pelat ASME SA516 grade 70 berdasarkan MSDS

Komposisi (%)											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	V	Nb
0.16	0.24	1.13	0.011	0.002	0.02	0.23	0.20	0.039	0.07	0.026	0.019

Material yang digunakan adalah baja tipe ASME SA516 grade 70N. Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia dari baja yang digunakan berdasarkan *Materials Safety Data Sheet* (MSDS) dari fabrikasi. Baja ini merupakan baja karbon-mangan atau baja ferit yang digunakan berdasarkan standar *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) untuk pembuatan bejana tekan dan peralatan pada suhu rendah atau sedang dan juga untuk peralatan yang menjadikan ketangguhan sebagai salah satu parameter utama.

METODOLOGI

Pelat yang gagal merupakan gabungan dua pelat SA516 Gr. 70N produksi manufaktur dari mancanegara dengan *heat no.* KA752 dimana komposisi kimianya ada pada tabel 1. Pelat tersebut telah dilakukan perlakuan panas *normalizing* pada suhu 930 °C selama 41 menit. Ukuran *cutting plan* masing-masing pelat adalah 315 x 305 x 17,7 mm. Ukuran *head* yang akan dibentuk adalah sebesar 2,5 m untuk internal diameternya. Metode las yang digunakan adalah SMAW, GMAW, dan SAW. Material kemudian diberi perlakuan panas *stress relief* setelah pengelasan selama 42 menit di suhu 620 °C. Setelah itu material dilakukan *cold forming* menjadi *head* dengan bentuk *ellipsoidal*.

Untuk menganalisis kegagalan, terlebih dahulu dihitung nilai kemampuan material kemudian dilakukan pengujian pada sampel berupa uji keras dengan metode brinell, uji tarik, uji metalografi, dan uji komposisi kimia. Untuk menganalisis foto metalografi, juga dilakukan perbandingan dengan material serupa pada pengujian yang lain. Pengujian dilakukan

bersama Seksi Analisa Kerusakan dan Sistem Pemeliharaan Balai Besar Bahan dan Barang Teknik (B4T).

Perhitungan Nilai Kemampuan

Untuk mengukur kemampuan material yang digunakan, dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai *crack consists of hot* (UCS), *cold cracking* (P_{cm}), dan *carbon equivalent* (CE). Suatu material memiliki kemampuan yang baik jika nilai UCS di bawah 30, nilai P_{cm} berada di antara 0,23-0,35%, serta berada di zona I atau II pada diagram graville (Suryo dan Umardani, 2020). Hasil perhitungan CE kemudian dibandingkan dengan nilai C pada diagram Graville. Komposisi kimia yang digunakan merujuk kepada hasil pengujian komposisi pelat yang ditunjukkan pada Tabel 1.

$$UCS = 230C + 190S + 75P + 45Nb - 12,3Si - 5,4Mn - 1$$

$$P_{cm} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$$CE/\% = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$$

Gambar 2. Diagram Graville (Datta, Mukerjee, Jha, Narasimhan, dan Veeraraghavan 2002)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk hasil perhitungan kemampuan berdasarkan komposisi kimianya, didapatkan nilai CE sebesar 0,4002, UCS sebesar 28,806, dan P_{cm} sebesar 0,2366. Karena tidak adanya informasi nilai persentase boron dalam material pelat, maka diasumsikan nilainya sangat kecil hingga mendekati 0. Berdasarkan diagram Graville, didapatkan bahwa material ini berada di zona II atau wilayah dapat dilas. Berdasarkan nilai UCS yang didapat, disimpulkan bahwa kemungkinan retaknya tidak tinggi. Dari kalkulasi P_{cm} didapatkan bahwa material yang digunakan adalah berada di wilayah sangat direkomendasikan yaitu berada di antara 0.23-0.35% (Suryo dan Umardani, 2020). Oleh karena itu, secara perhitungan kemampuan material ini tidak perlu penanganan yang terlalu rumit. Standar pun tidak mewajibkan adanya penanganan khusus seperti prasyarat *preheating* selama ketebalannya tidak melebihi 32 mm.

Pengujian kekerasan dengan metode brinell ditunjukkan pada Tabel 2. Berdasarkan pengujian tersebut, didapatkan nilai kekerasan sebesar 300 HBW. Nilai tersebut jauh berada di atas standar yang seharusnya, yaitu berkisar diantara 151-154 HBW. Peningkatan kekerasan ini dapat disebabkan berbagai faktor, yaitu terbentuknya fase yang lebih keras (dicurigai martensit), terbentuknya karbida, atau berubahnya sifat butir akibat proses las dan *cold forming*.

Nilai kekerasan hasil las dapat meningkat karena adanya nilai yang terlalu rendah dari kecepatan las dan heat input yang berlebih. Kemudian laju pendinginan yang tinggi juga

menyebabkan hal yang sama (Amin, Hanna, dan Khider 2020). Tiga hal ini dimungkinkan terjadi pada pengelasan pelat sebelum *cold forming*. Mekanismenya adalah dengan adanya perubahan persebaran butir dan transformasi fase akibat adanya *heat input* dan pendinginan. Selama baja mengalami pendinginan dari keadaan leleh, austenit pada HAZ akan menjadi lebih kasar dan akan bertransformasi membentuk ferit dengan berbagai morfologi (Amanie, Oguocha, dan Yannacopoulos 2012). Namun ini juga dapat disebabkan oleh adanya fase martensit yang terbentuk. Walaupun berdasarkan hasil pengujian menunjukkan nilai 300 HBW, sedangkan martensit umumnya dapat mencapai nilai 700 HBW, ini diakibatkan oleh perlakuan panas *stress relief* yang dilakukan. Martensit pun mengalami pelunakan akibat perlakuan panas di atas 204 °C, sedangkan yang suhu yang diterapkan adalah 620 °C (Grange, Hribal, dan Porter 1977).

Tabel 2. Nilai kekerasan pelat ASME SA516 grade 70N

Material	Nilai Kekerasan (HBW)
Standar ASME SA 516 gr. 70N	151-164
Hasil Pengujian	300

Perbandingan nilai uji tarik pada pelat ASME SA516 grade 70N ditunjukkan pada Tabel 3. Hasil pengujian menunjukkan adanya peningkatan kekuatan baik pada nilai *yield* atau *tensile* serta penurunan elongasi dibandingkan kondisi pelat pada awalnya. Nilai kekuatan *tensile* dan elongasi masih sesuai dengan standar, sedangkan nilai *yield* berada terlalu tinggi di atas standar.

Berdasarkan analisis sebelumnya juga dapat dimungkinkan terbentuknya ferit dengan berbagai morfologi, khususnya asikuler, dimana hal ini dapat memengaruhi kekuatan material. Pembentukan ferit asikuler menyebabkan kekuatan *yield* dan *tensile* meningkat. Secara bersamaan persentase inklusi las mengurangi nilai elongasi jika fluks yang digunakan mengandung TiO_2 . Peningkatan kekuatan dan penurunan elongasi pada area terpengaruh panas juga disebabkan *heat input* yang berlebih (Amin, Hanna, dan Khider, 2020). Adapun laju pendinginan yang sangat tinggi dapat menurunkan ketangguhan karena mendukung pembentukan konstituen mikro keras seperti martensit dan bainit (Amanie, Oguocha, dan Yannacopoulos 2012).

Tabel 3. Kekuatan pelat ASME SA516 grade 70N

Material	Kekuatan yield (MPa)	Kekuatan tensile (MPa)	Elongasi (%)
Standar ASME SA516 gr. 70N	335	510-650	>17
Pelat Sebelum las	372	531	26
Pelat setelah las	603	621	21.8

Gambar 3. (a-b) mikrostruktur *base material* perbesaran 200× dan 500×, (c) mikrostruktur daerah las perbesaran perbesaran 500×, (d) mikrostruktur martensit pada ASME SA516 grade 70 perbesaran 1000× (Oyyaravelu, Kuppan, dan Arivazhagan 2016)

Hasil pengujian metalografi, dapat dilihat pada Gambar 3(a-b) bahwa terdapat dua fase pada *base material*, yaitu ferit yang berwarna putih dan perlit yang berwarna hitam. Perlit yang terlihat membentuk bentuk *banding* dimana ini dihasilkan dari proses normalisasi. Adapun pada Gambar 3(c) menunjukkan adanya fase martensit yang terbentuk di wilayah HAZ karena selama pengelasan dengan *heat input* yang tinggi dan laju pendinginan yang cepat. Fase martensit ini juga serupa dengan referensi pada Gambar 3(d) dimana terbentuk martensit yang berbentuk seperti jarum.

Keberadaan fase martensit ini disimpulkan berdasarkan hasil uji metalografi material yang serupa pada bagian *weld metal* dari penelitian lain. Fase martensit terbentuk di area las dihasilkan dari *heat input* yang tinggi dan laju pendinginan yang cepat ketika proses pengelasan (Oyyaravelu, Kuppan, dan Arivazhagan, 2016). *Heat input*

menentukan lebar HAZ dan terbentuknya martensit. Hal ini berdasarkan persamaan :

$$y = \left(\frac{1}{T_p - T_o} - \frac{1}{T_m - T_o} \right) \times \left(\frac{H_{net}}{(2\pi e)^{0.5} \times \rho \times C \times t} \right)$$

dimana

T_p : Temperatur tertinggi (°C)

T_o : Tempertarur plat (°C)

T_m : Temperatur leleh *base metal* (°C)

π : 3,14

e = Brigg number (2,7....)

ρ = Denstias logam (kg/m³)

C = *Spesific heat capacity* (J/kg °C)

t = ketebalan logam (mm)

Jika nilai $y < 0$ maka proses las berjalan dengan baik sedangkan jika $y > 0$ maka proses las harus dihentikan (Suryo dan Umardani, 2020).

Tabel 4. Komposisi kimia pelat ASME SA516 grade 70N

Material	Unsur (%)				
	C	Si	Mn	P	S
Standar ASME SA516 gr. 70	maks. 0.29	0.13-0.45	0.79-1.3	maks. 0.035	maks. 0.035
Pelat sebelum las	0.16	0.24	1.13	0.011	0.002
Base metal setelah las	0.127	0.226	1.12	0.010	< 0.0003
Weld metal setelah as	0.076	0.344	1.19	0.014	0.007

Heat input yang besar ini dapat terjadi karena kesalahan proses pengelasan yang dilakukan oleh operator karena tidak mengikuti WPS yang berlaku seperti tidak dilakukannya *preheat* dengan benar dan terjadinya *overcurrent*. Namun, fase martensit ini dimungkinkan hanya terbentuk dalam jumlah yang sedikit di *base metal* dan terbanyak di bagian HAZ, sehingga keberadaannya tidak memengaruhi nilai kekuatan tarik dan elongasi material secara keseluruhan, serta hanya menjadi titik awal retak karena sifatnya yang getas. Hal ini juga ditambah pengaruh *stress relief* yang dapat mengurangi tegangan pada fase martensit.

Sedangkan perlit ini bersifat lebih keras, sangat kuat, dan sangat cacat jika dibandingkan dengan ferit (Pankaj, Arya, dan Verma 2017). Oleh karena itu, fase perlit yang terlalu banyak juga dapat menjadi titik awal keretakan. Terlebih fase perlit membentuk *banding* sehingga karbon terkonsentrasi pada bagian tertentu. Keberadaan fase perlit yang membentuk *banding* juga menandakan bahwa *normalizing* yang dilakukan tidak berhasil secara sempurna. Seharusnya perlit tersebar secara merata, tidak berkumpul sehingga membentuk *banding*. Konsentrasi karbon pada struktur *banding* juga dapat menjadi lokasi terbentuknya martensit. Selain itu, stuktur *banding* seperti ini juga dapat menyebabkan proses pemesian dan *cold forming* menjadi lebih sulit (Grange 1971). Oleh karena itu, pengujian metalografi juga harus dilakukan sebelum proses *cold forming* yang dimana dalam pengujian ini tidak dilakukan. Uji metalografi ini mengacu ke standar ASTM A 20 klausul 8.2. Baja harus dipastikan telah dilakukan *normalizing* dan berbutir halus karena memiliki ketangguhan yang lebih tinggi daripada baja berbutir kasar. Berdasarkan ASTM E112 ukuran butir halus nilainya adalah di atas 4.

Hasil pengujian komposisi kimia di wilayah *base material* dan *weld metal* yang ditunjukkan pada Tabel 4 menunjukkan adanya penurunan kadar karbon atau dekarburisasi yang cukup signifikan dibandingkan standar dan pelat ketika sebelum las, khususnya pada bagian *weld metal*. Zona las yang mengalami dekarburisasi menghasilkan daerah ferit dengan kekerasan rendah. Dekarburisasi terjadi selama proses pengelasan dimana karbon dalam baja bergerak ke arah wilayah las dengan pembentukan karbida atau fase martensit. Dekarburisasi harus dihilangkan segera setelah pengelasan dengan prosedur perlakuan panas *normalizing*, namun pada pengujian ini hanya dilakukan *stress relief* setelah proses las (Lu, Yu, dan Sisson 2017).

Mengetahui penyebab dan mekanisme terjadinya kegagalan dalam pembentukan *ellipsoidal head pressure vessel* dari dua pelat dilas ASME SA516 grade 70N dengan menggunakan metode fabrikasi *cold forming*, berdasarkan hasil dari pengujian kekerasan, tarik, metalografi, komposisi kimia, serta perhitungan untuk kemampulannya diharapkan dapat menjadi preferensi dalam mengatasi keterbatasan bahan baku pelat di pasaran. Proses *preheat* yang tidak sesuai serta *heat input* yang terlalu besar akibat kesalahan proses pengelasan yang dilakukan oleh operator, karena tidak mengikuti WPS yang berlaku merupakan faktor yang sangat menentukan.

KESIMPULAN

1. Berdasarkan kalkulasi nilai P_{cm} , UCS, dan diagram Graville, material ASME SA516 grade 70N yang digunakan memiliki nilai kemampulan yang baik, sehingga proses pengelasan pada material ini dapat dilakukan.
2. Berdasarkan hasil tes uji kekerasan, tarik, metalografi, dan komposisi kimia didapatkan bahwa material mengalami peningkatan

kekerasan, kekutan *yield* dan *tensile*, terbentuknya fase martensite di sekitar HAZ, dan material mengalami dekarburisasi.

3. Proses *Preheat* yang salah dan *heat input* yang terlalu besar pada saat pengelasan dan laju pendinginan yang cepat menyebabkan terbentuknya fase martensit pada HAZ.
4. Retak pada HAZ saat *cold forming* disebabkan oleh adanya fase martensit yang bersifat getas sehingga retak saat proses *cold forming*.

SARAN

Proses pembentukan *head* dengan *cold forming* dari penggabungan dua material yang dilas tidak direkomendasikan. Proses pembuatan *head* dari sambungan las dapat menggunakan metode petal dimana pelat dibentuk terlebih dahulu dengan metode *cold forming* baru disambung dengan cara dilas. Rekomendasi lain adalah dilakukan *hot forming* dengan material pelat khusus (pelat spesial order), dimana *cutting plan* pelatnya sesuai untuk ukuran ID besar, misal 2,5 m seperti kasus ini

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Balai Besar Bahan dan Barang Teknik (B4T) Seksi Analisa Kerusakan dan Sistim Pemeliharaan atas dilakukannya pengujian kekerasan, metalografi, tarik, dan komposisi kimia.

DAFTAR PUSTAKA

- Amanie, J, I N A Oguocha, dan S Yannacopoulos. 2012. "Effect Of Submerged Arc Welding Parameters On Microstructure Of SA516 Steel Weld Metal". *Canadian Metallurgical Quarterly* 51 (1): 48-57.
- Amin, Samir A., Mohannad Y. Hanna, dan Abdulaziz S. Khider. 2020. "Study Of Mechanical Properties Of Carbon Steel Plates SA-516 Gr. 70 Welded By SAW Using V-Shape Joint Design". *Engineering And Technology Journal* 38 (2A): 152-165.
- B4T report: "Failure Analyses Head V 5010", 2008
- Datta, R., Mukerjee, D., Jha, S., Narasimhan, K. dan Veeraraghavan, R., 2002. Weldability characteristics of shielded metal arc welded high strength quenched and tempered plates. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11(1), pp.5-10.
- Grange, R. A. "Effect of microstructural banding in steel." *Metallurgical Transactions* 2, no. 2 (1971): 417-426.
- Grange, R., Hribal, C. dan Porter, L., 1977. Hardness of tempered martensite in carbon and low-alloy steels. *Metallurgical Transactions A*, 8(11), pp.1775-1785.
- Kumar, Pankaj, H. K. Arya, dan Sandeep Verma. "Effect of post weld heat treatment on impact toughness of SA 516 GR. 70 Low Carbon Steel Welded by Saw Process." *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* ISSN: 2321-9653.
- Lu, Y., Yu, H. dan Sisson Jr, R.D., 2017. The effect of carbon content on the c/a ratio of as-quenched martensite in Fe-C alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 700, pp.592-597.
- Moss, Dennis R., dan Michael Basic. *Pressure Vessel Design Manual*. 4th ed. Amsterdam: Elsevier/Gulf Professional, 2013.
- Oyyaravelu, R., Kuppan, P. dan Arivazhagan, N., 2016. Metallurgical and mechanical properties of laser welded high strength low alloy steel. *Journal of Advanced Research*, 7(3), pp.463-472.
- Raghavaiah, Nelaturi. (2020). BPVC Sec VIII div 1 and 2. 2. 525-526.
- Suryo, S. H., dan Y. Umardani. "Calculation program for steel weldability by considering the heat affected zone (HAZ) width of welded joint." *Metalurgija* 59, no. 2 (2020): 153-15.