

Analisis Pengaruh *Heat Treatment* terhadap Sifat Mekanik dan Ketahanan Korosi Intergranular SA-240 TP316L

Adhi Setiawan^{1*}, Puguh Pribadhi², Muhamad Ari³
^{1,2,3}Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

*adhstw23@gmail.com

Abstract

Intergranular corrosion is a problem that often occurs in welding stainless steel materials. Intergranular corrosion is caused by carbide precipitation which occurs at a temperature of 850°C, causing a reduction in chromium content in the Heat Affected Zone (HAZ). The intergranular corrosion process can be controlled by the heat treatment method after the welding process. This study aims to study the effect of heat treatment on mechanical properties and intergranular corrosion resistance of SA240 TP316L material. The variation of heat treatment were divided into three solution treatment (ST), quenching treatment (QC), and non-treatment (NT). Mechanical properties testing using tensile test while corrosion resistance testing using linear polarization using H₂SO₄ 0.1 M solution. Morphology and metal composition in the HAZ area were analyzed using SEM-EDX. Tensile test results showed that welding with ST had the lowest yield strength, ultimate strength, and elongation values compared to specimens of 407.55 MPa, 599.33 MPa, and 44.53%. Corrosion test results found that welding with solution treatment has the lowest corrosion rate compared to specimens with quenching treatment (QC) and non treatment (NT). Corrosion rate in each ST, QC, and NT specimens was 0.90; 1.03; and 2.35 mmpy. The results showed that the solution treatment process can improve intergranular corrosion resistance.

Keywords :stainless steel , intergranular corrosion , solution treatment.

Abstrak

Korosi intergranular merupakan permasalahan yang sering terjadi pada pengelasan material baja tahan karat. Korosi intergranular disebabkan oleh presipitasi karbida yang terjadi pada suhu sekitar 850°C sehingga menyebabkan berkurangnya kandungan krom di bagian *Heat Affected Zone* (HAZ). Proses korosi intergranular dapat dikendalikan dengan metode *heat treatment* setelah proses pengelasan. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh *heat treatment* terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi intergranular material SA240 TP316L. Variasi *heat treatment* dibagi menjadi tiga yaitu *solution treatment* (ST), *quenching treatment* (QC), dan *non treatment* (NT). Pengujian sifat mekanik menggunakan *tensile test* sedangkan pengujian ketahanan korosi menggunakan polarisasi linear menggunakan larutan H₂SO₄ 0,1 M. Morfologi dan komposisi logam pada daerah HAZ dianalisis menggunakan SEM-EDX. Hasil *tensile test* menunjukkan bahwa pengelasan dengan *solution treatment* memiliki nilai *yield strength*, *ultimate strength*, dan *elongation* terendah dibandingkan dengan spesimen yaitu 407,55MPa, 599,33MPa, dan 44,53%. Hasil uji korosi diketahui pengelasan dengan *solution treatment* memiliki laju korosi terendah dibandingkan dengan spesimen dengan *quenching treatment* (QC) dan *non treatment* (NT). Laju korosi pada masing-masing spesimen ST, QC, dan NT sebesar 0,90;1,03; dan 2,35 mmpy. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *solution treatment* dapat memperbaiki ketahanan korosi intergranular.

Kata kunci :baja tahan karat , korosi intergranular, *solution treatment*

1. Pendahuluan

Stainless steel (baja tahan karat) type austenitic adalah salah satu tipe *stainless steel* yang sangat familiar dan termasuk *non*

magnetic. Material tersebut memiliki kelebihan yaitu mudah dibentuk serta memiliki sifat mampu las yang cukup baik. Baja tahan karat austenitik banyak digunakan pada

struktur teknik yang beroperasi pada suhu tinggi seperti material pipa superheater di boiler[1].

Pengelasan material *stainless steel* berbeda dengan pengelasan pada *carbon steel*. Permasalahan yang sering terjadi pada pengelasan *stainless steel* adalah korosi intergranular. Korosi intergranular yaitu korosi yang terjadi pada batas butir. Korosi intergranular pada baja tahan karat merupakan salah satu jenis korosi terlokalisasi. Pada saat baja tahan karat terserang korosi intergranular, permukaan logam masih terlihat sangat cerah dan mulus tetapi mudah sekali rapuh terhadap tekanan luar. Korosi intergranular cukup sulit terdeteksi secara visual dan menyebabkan peralatan rusak secara tiba-tiba [2]. Korosi intergranular dari baja tahan karat dapat diamati pada bagian sambungan pengelasan dengan suhu antara 500 dan 850° C[1]. Korosi intergranular terjadi karena deplesi kromium pada batas butir yang disebabkan kromium karbida ($Cr_{23}C_6$). Ketika baja tahan karat austenitic terpapar dalam waktu yang lama pada suhu antara 500 dan 850°C terjadi proses presipitasi karbida. Sejumlah besar fase selain $Cr_{23}C_6$ terbentuk antara lain Cr_6C dan fase sigma, fase intermetalik chi dan *laves*[3]. Fase sigma yang terbentuk memiliki kandungan kromium dan molybdenum yang lebih tinggi dibandingkan dengan fase austenite sehingga presipitasi di batas butir menyebabkan deplesi unsur-unsur tersebut pada bagian matriksnya.

Beberapa usaha dapat dilakukan untuk meningkatkan ketahanan korosi intergranular pada baja tahan karat antara lain mengurangi komposisi karbon, mengubah komposisi logam, meningkatkan ukuran butir kristal, meningkatkan waktu proses sensitasi dan desensitasi [4]. Penurunan kadar karbon kurang dari 0,03% pada baja tahan karat tipe AISI 304L dan 316L dapat menekan terjadinya korosi intergranular namun hal tersebut dapat menurunkan *yield strength* austenite pada kondisi *annealing*.

Beberapa peneliti telah melaporkan terkait permasalahan korosi intergranular pada baja tahan karat. Terada dkk.[5] dalam

penelitiannya melaporkan bahwa pengaruh presipitasi terhadap ketahanan korosi baja tahan karat AISI 316L(N) yang sebelumnya mengalami uji *creep* pada suhu 600°C selama 10 tahun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kerentanan korosi dipengaruhi oleh suhu *aging* dan waktu pengujian *creep*. Li dkk [4] melaporkan bahwa ukuran peningkatan ukuran butir kristal cenderung menurunkan derajat sensitasi yang menyebabkan korosi intergranular. Takei dkk [6] mempelajari pengaruh kondisi pendinginan terhadap ketahanan korosi intergranular dari UNS S32506 Duplex baja tahan karat. Proses *quenching* pada suhu di bawah 800°C setelah pendinginan udara dengan laju yang konstan dapat meningkatkan potensi korosi intergranular. Informasi tentang proses intergranular korosi akibat pengelasan material SA-240 TP316L belum dijelaskan secara detail pada peneliti sebelumnya. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh perlakuan panas (*heat treatment*) pengelasan terhadap ketahanan korosi intergranular dan sifat mekanik material SA-240 TP316L.

2. Metoda Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu logam induk yang akan digunakan yaitu SA 240 TP 316L sesuai dengan spesifikasi yang tertera pada ASME II A (A 240/A 240 M). Elektroda yang digunakan pada proses pengelasan yaitu menggunakan E316L-16. Data spesifikasi dan komposisi kimia SA 240 TP 316L disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2 [7]. Penelitian ini menggunakan peralatan las SMAW dengan polaritas *Direct Current Reversed Polarity* (DCRP). Peralatan digunakan sebagai pengujian antara lain tanur muffle (*muffle furnace*), alat ukur laju korosi potensiostat/galvanostat, uji tarik (*tensile test*), dan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDX).

Tabel 1. Spesifikasi SA 240 TP 316L (ASME IIA, 2013)

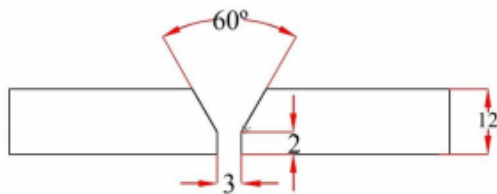
Spesifikasi	Nilai
Tensile strength (Mpa)	485
Yield strength (MPa)	170
Elongation 50 mm (in)	40
Hardness Brinell	217

Tabel 2. Komposisi kimia SA 240 TP 316L (ASME IIA, 2013)

Unsur	Komposisi (%wt)
Karbon (C)	0,03
Mangan (Mn)	2,00
Fosfor (P)	0,45
Belerang (S)	0,03
Silikon (Si)	0,75
Krom (Cr)	16-18
Mangan (Mn)	2-3
Nitrogen (N)	0,1

2.2. Proses Pengelasan

Dimensi material baja tahan karat yaitu sebesar 300 mm x 150 mm x 12 mm. Desain sambungan yang digunakan adalah V joint dengan sudut sebesar 60° serta *root gap* dan *root face* masing-masing 3 mm dan 2 mm seperti pada Gambar 1. Parameter pengelasan berdasarkan WPS No.S-8M-L61 (PT. Petrokimia Gresik) dengan mengacu pada ASME SECTION IX. Parameter pengelasan meliputi kuat arus 80-120 A, tegangan 30 V, dan kecepatan 8-10 cm/menit.



Gambar 1. Desain pengelasan dalam satuan mm

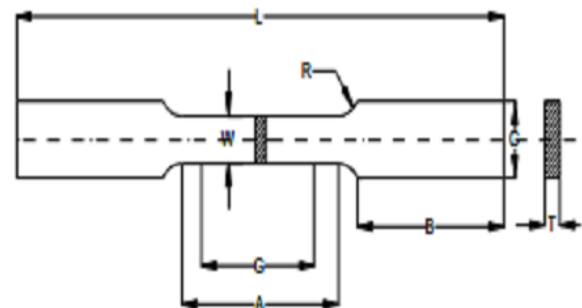
Penelitian ini menggunakan tiga jenis perlakuan panas (*heat treatment*) pada proses pengelasan antara lain pengelasan dengan *solution treatment* (ST), Pengelasan dengan dengan *quenching treatment* pasca pengelasan (QT), dan pengelasan tanpa perlakuan panas (NT).

Metode *solution treatment* (ST) dilakukan dengan melakukan pengelasan sampai dengan suhu 1040°C dan didinginkan dengan udara sampai dengan suhu normal. Hasil pengelasan tersebut selanjutnya

dipanaskan kembali sampai dengan suhu 1040°C selama 15 menit di dalam *muffle furnace*. Material selanjutnya didinginkan cepat menggunakan media pendingin air pasca pengelasan sampai suhunya mencapai 250°C. Proses pengelasan dengan *quenching treatment* (QT) dilakukan dengan melakukan pengelasan sampai dengan suhu 1040°C dan menerapkan tambahan *quenching* pasca pengelasan dengan disemprot air pada setiap pass-nya sampai suhu 250°C baru dilanjutkan pengelasan kembali. Pada sampel tanpa *treatment* (NT) pengelasan dilakukan sampai dengan suhu 1040°C dan dibiarkan dingin oleh udara.

2.3. Analisis

Kuat tarik spesimen di uji menggunakan peralatan Universal Testing Machine Shimadzu UH-600 KNI. Pengujian kuat tarik menggunakan Standar ASTM E-8 dengan spesimen uji seperti pada Gambar 2. Dimensi spesimen uji tarik disajikan pada Tabel 3. Pengujian tarik (*tensile test*) bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat mekanik material seperti *ultimate strength*, *elongation*, dan *yield point* (ASME IX, 2013).



Gambar 2. Spesimen uji tarik

Tabel 3. Dimensi spesimen uji tarik

Keterangan	Panjang (mm)
Gage length (G)	50
Length of reduced section (A)	57
Width (W)	12,5
Thickness (T)	10
Radius of fillet (R)	12,5
Overall length (L)	200
Length of grip section (B)	50
Width of grip section (C)	20

Ketahanan korosi baja tahan karat pada variasi perlakuan panas dilakukan menggunakan metode polarisasi linear (PGSTAT 32 METROHM) dengan elektroda *reference* berupa Ag/AgCl, elektroda *counter* berupa platina. Logam yang diuji sebagai elektroda kerja. Daerah las yang akan diuji adalah perpotongan melintang dari hasil pengelasan meliputi *weld metal*, *base metal*, dan *Heat Affected Zone* (HAZ). Larutan pengujian korosi menggunakan H₂SO₄ dengan konsentrasi larutan sebesar 0,1 M. Rapat arus korosi (I_{corr}) dapat diketahui pada pembacaan grafik polarisasi linear pengujian korosi sel tiga elektroda menggunakan metode Ekstrapolasi Tafel. Lalu laju korosi dapat dihitung dengan menggunakan rumus (1) berikut [8]:

$$CR = \frac{KI_{corr} EW}{\rho} \quad (1)$$

Keterangan:

CR = laju korosi (mmpy)

K = $3,27 \times 10^{-3}$ mm.g/ μ A.cm.y

I_{corr} = rapat arus korosi (μ A/cm²)

EW = berat ekuivalen spesimen (g/mol)

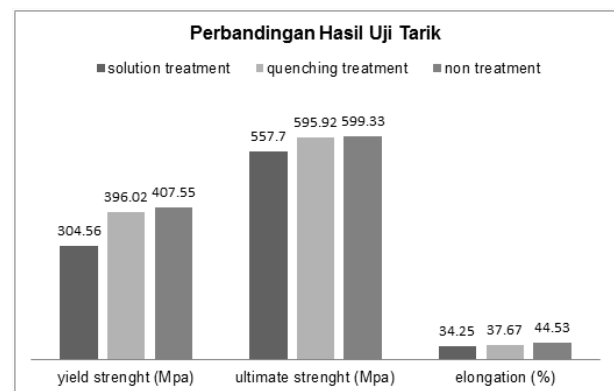
ρ = densitas spesimen (g/cm³)

Analisis morfologi dan komposisi kimia permukaan logam yang terkorosi intergranular dianalisis menggunakan metode SEM-EDX (Phenom desktop ProX).

3. Hasil Penelitian

Gambar 3 menunjukkan hasil uji tarik dari ketiga jenis variasi pengelasan yaitu *solution treatment* (ST), *quenching pasca pengelasan* (QT), dan pengelasan tanpa tambahan *heat treatment* (NT). Hasil pengujian yang disajikan pada Gambar 3 merupakan nilai rerata dengan intensitas empat pengujian pada setiap perlakuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelasan tanpa tambahan *heat treatment* memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan spesimen dengan perlakuan ST dan QT. Hal tersebut dapat diamati dari nilai parameter *yield stress*, *ultimate stress*, dan *elongation* mencapai nilai tertinggi pada

kondisi tanpa tambahan perlakuan panas. Pada kondisi tersebut nilai *yield stress*, *ultimate stress*, dan *elongation* masing sebesar 407,55 MPa, 599,33 MPa, dan 44,53%. Pengelasan dengan tambahan *solution treatment* memiliki nilai terendah pada *yield stress*, *ultimate stress*, dan *elongation* yaitu 304,56 MPa, 557,70 MPa, dan 34,25%. Berdasarkan uji kekuatan tarik, benda yang telah mengalami perlakuan panas memiliki kekuatan yang menurun dibandingkan dengan benda sebelum mengalami perlakuan panas. Hal tersebut disebabkan karena butir kristal yang terbentuk menjadi besar. Butir yang besar akan membuat kekuatan baja menjadi rendah sehingga baja mudah putus [9].



Gambar 3. Grafik hasil uji tarik (*tensile test*)

Herliansyah dan Dewo (2014) [10] melaporkan hasil penelitian yang serupa tentang pengaruh suhu *annealing* terhadap sifat mekanik dari baja tahan karat 316L. Proses *annealing* (pemanasan) menyebabkan peningkatan ukuran butir kristal (*crystal grain*) serta menurunkan jumlah butir kristal sehingga berpengaruh pada penurunan dislokasi di batas butir (*grain boundary*). Hal tersebut menyebabkan terjadinya penurunan sifat mekanik logam.

Tabel 4 menunjukkan hasil pengujian korosi baja tahan karat dengan variasi perlakuan panas. Hasil pengujian korosi menunjukkan bahwa spesimen ST memiliki nilai I_{corr} yang paling rendah dibandingkan dengan spesimen QT dan NT. Besarnya laju korosi spesimen ST diperoleh sebesar 0,9 mmpy. Hal tersebut mengindikasikan bahwa

ketahanan korosi spesimen ST lebih baik dibandingkan dengan spesimen QT dan NT. Proses ST dengan pemanasan tambahan sampai suhu 1040°C cenderung menyebabkan ukuran butir kristal meningkat. Li dkk. [5] melaporkan bahwa ukuran butir mempengaruhi waktu untuk memulai sensitisasi dan untuk mencapai sensitisasi lengkap. Peningkatan ukuran butir kristal dapat menunda timbulnya sensitisasi karena butir dengan ukuran besar memiliki zona penurunan kromium yang lebih luas dan konsentrasi kromium batas butir yang lebih rendah. Studi tentang pengukuran tingkat sensitisasi dan perilaku presipitasi $Cr_{23}C_6$ pada stainless steel menunjukkan bahwa proses sensitisasi dipercepat ketika ukuran butir semakin kecil. Selain itu, proses *heat treatment* pada sampel ST dapat menyebabkan pelarutan kembali kromium karbida pada batas butir (*grain boundary*). Bahkan, dengan proses pendinginan cepat setelah proses *heat treatment* dapat menekan proses sensitisasi yang mengarah pada peningkatan ketahanan korosi intergranular [11].

Tabel 4. Hasil analisis polarisasi linier

Spesimen	I _{corr} (μA/cm ²)	CR (mmpy)
ST	40,27	0,90
QT	46,28	1,03
NT	105,11	2,35

Gambar 4 menunjukkan tidak adanya indikasi korosi intergranular pada sampel ST karena tidak adanya indikasi berupa penebalan pada batas butir di daerah HAZ (*Heat Affected Zone*). Pada sampel QT menunjukkan terdapat sedikit penebalan pada batas butir di daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) yang merupakan indikasi terjadinya korosi intergranular sedangkan pada sampel NT menunjukkan terdapat banyak sekali penebalan pada batas butir di daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) yang merupakan indikasi terjadinya korosi intergranular.

Hasil SEM baja tahan karat 316L setelah pengujian korosi. Daerah dengan penebalan dapat mengindikasikan tingkat kerusakan akibat korosi intergranular. Hasil pengamatan secara visual menunjukkan bahwa penebalan

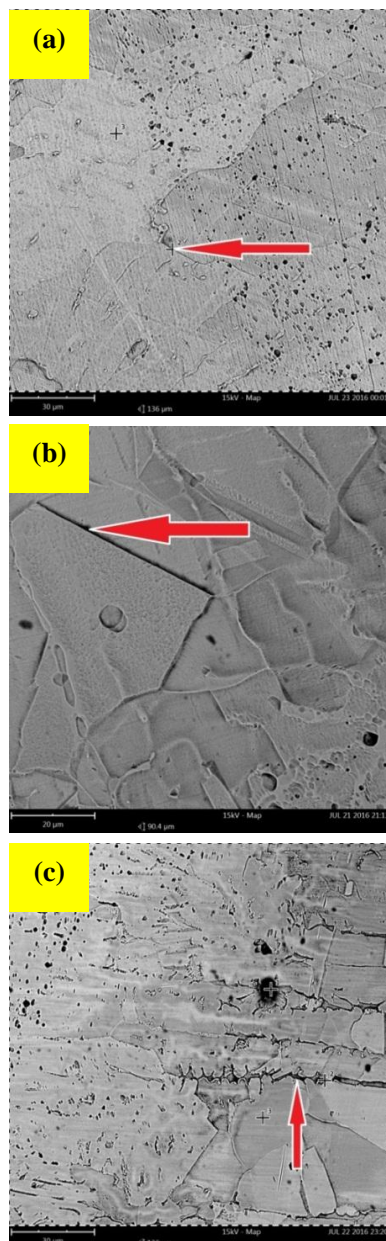
area batas butir pada spesimen NT cenderung lebih banyak terlihat dibandingkan dengan spesimen ST dan QC. Hal ini menunjukkan bahwa proses *heat treatment* setelah pengelasan disertai dengan pendinginan cepat menghasilkan ketahanan korosi intergranular yang lebih baik dibandingkan sampel yang hanya mengalami *quenching* (QC) dan tanpa treatment (NT). Proses *heat treatment* dapat memungkinkan larutnya (*dissolution*) kromium karbida ($Cr_{23}C_6$) yang terbentuk pada batas butir akibat proses pengelasan [12].

Komposisi kimia pada batas butir di daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) hasil analisis menggunakan EDX dapat disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil analisis EDX

Unsur	konsentrasi (%)		
	ST	QT	NT
Karbon (C)	1,1	0,7	9,3
Krom (Cr)	17,5	15,2	3,8
Besi (Fe)	56,6	60,4	14,7
Oksigen (O)	12,9	9,5	47,1
Lain-lain	11,9	14,2	25,1

Hasil analisis EDX pada variasi pengelasan tanpa *heat treatment* memiliki kandungan kromium yang paling rendah dibanding kedua sampel lain serta persentase karbon (C) yang paling tinggi dan dikarenakan adanya presipitasi karbida krom ($Cr_{23}C_6$). Persentase kandungan oksigen (O) pada hasil pengelasan tanpa *heat treatment* (NT) paling tinggi dibandingkan dengan spesimen ST dan QT. Kandungan unsur oksigen berasal dari produk korosi berupa oksida logam. Berdasarkan hasil SEM-EDX menunjukkan bahwa spesimen hasil pengelasan tanpa *heat treatment* (NT) memiliki tingkat kerentanan terhadap korosi intergranular lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan *solution treatment* (ST) dan *quenching treatment* (QC).



Gambar 4. Morfologi korosi intergranular pada spesimen (a) ST (b) QT dan (c) NT

4. Kesimpulan

Proses *heat treatment* pada proses pengelasan berpengaruh pada sifat mekanik dan ketahanan korosi intergranular logam SA 240 TP 316L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses perlakuan menggunakan *solution treatment* (ST) setelah proses pengelasan cenderung menghasilkan sifat kekuatan tarik yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan *quenching treatment* (QC) dan tanpa *treatment* (NT). Spesimen pengelasan dengan metode *solution*

treatment memiliki nilai *yield strength*, *ultimate strength*, dan *elongation* yaitu 304,56MPa, 557,70MPa, dan 34,25%. Sampel dengan tambahan metode *quenching* pasca pengelasan memiliki *yield strength*, *ultimate strength*, dan *elongation* yaitu 396,02 MPa, 595,92 MPa, dan 37,67%. Hasil pengujian tarik spesimen tanpa *heat treatment* memiliki *yield strength*, *ultimate strength*, dan *elongation* tertinggi yaitu 407,55MPa, 599,33MPa, dan 44,53%. Proses *solution treatment* dapat memperbaiki ketahanan korosi intergranular. Hasil pengujian pengujian polarisasi linear menunjukkan bahwa I_{CORR} dan laju korosi terendah dicapai dengan spesimen dengan *solution treatment* yaitu sebesar $40,27\mu A/cm^2$ dan 0,9 mmpy.

5. Saran

Diperlukan adanya penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh pengelasan terhadap sifat mekanik seperti tingkat kekerasan material serta pengaruh *heat treatment* terhadap perubahan ukuran grain dan komposisi fasa dari material sebelum dan setelah pengelasan.

6. Daftar Pustaka

- [1] M. Laleh, A.E. Hughes, W. Xua, N. Haghdadib, K. Wang, P. Cizek, I. Gibsona, and M.Y. Tan, "On the Unusual Intergranular Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel Additively Manufactured by Selective Laser Melting," *Corrosion Science*, vol. 161, pp. 1081–1089, 2019
- [2] S. Lin, W. Bao, J. Gao, and J. Wang, "Intergranular Corrosion of Austenitic Stainless Steel," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 229-231, no.2012, pp 14–17, 2012
- [3] Z. Stonawská, M. Svoboda, M. Sozańska, M. Křístková, J. Sojka C, Dagbert, and L. Hyspecká, "Structural Analysis and Intergranular Corrosion Tests of AISI 316L Steel," *Journal of Microscopy*, vol. 224, no. 1, pp. 62–64, 2006

- [4] S. Li, Y. He, S. Yu, and P. Zhang, "Evaluation of The Effect of Grain Size on Chromium Carbide Precipitation and Intergranular Corrosion of 316L Stainless Steel," *Corrosion Science*, vol. 66, pp. 211–216, 2013
- [5] M. Terada, D.M. Escriba, I. Costa, E. Materna-Morris, and A.F. Padilha, "Investigation on the Intergranular Corrosion Resistance of the AISI 316L(N) Stainless Steel After Long Time Creep Testing at 600 °C," *Materials Characterization*, vol. 59, pp. 663–668, 2008
- [6] T. Takei, M. Yabe, and F. Wei, "Effect of Cooling Condition on the Intergranular Corrosion Resistance of UNS S32506 Duplex Stainless Steel," *Corrosion Science*, vol. 122, pp. 80–89, 2017
- [7] ASME Sec. II Part A, *Ferrous Material Specifications*. New York: USA, 2013
- [8] A. Setiawan, "Sintesis dan Karakterisasi ZnO sebagai Coating Antikorosi ZnO/Al(OH)₃ pada Material Baja Karbon," *Jurnal Teknik*, vol. 39, no.1, pp. 55–61, 2018
- [9] R. Rubijanto, "Pengaruh Proses Pendinginan Paska Perlakuan Panas Terhadap Uji Kekerasan (Vickers) dan Uji Tarik Pada Baja Tahan Karat 304 Produksi Pengecoran Logam di Klaten," *Jurnal Traksi*, vol. 4, no.1, pp. 12–19, 2006
- [10] M.K. Herliansyah, P. Dewo, M.H.N.E. Soesatyo, and W. Siswomihardjo, "The Effect of Annealing Temperature on the Physical and Mechanical Properties of Stainless Steel 316L for Stent Application," in *International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering*, 2015, pp. 22–26
- [11] X. Yu, S. Chen, Y. Liu, and F. Ren, "A Study of Intergranular Corrosion of Austenitic Stainless Steel by Electrochemical Potentiodynamic Reactivation, Electron Back-Scattering Diffraction and Cellular Automaton," *Corrosion Science*, vol. 52, pp. 1939–1947, 2010
- [12] F. J. G. Silva, J. Santos and R. Gouveia, "Dissolution of Grain Boundary Carbides by the Effect of Solution Annealing Heat Treatment and Aging Treatment on Heat-Resistant Cast Steel HK30," *Metals*, vol. 7, no.2, pp. 1–12, 2017