

Mitigasi Korosi Galvanik pada Aplikasi Sambungan Perpipaan: Rasio Area Permukaan dan Analisis Mikroskopis

Prihatno Kusdiyarto ^{a, *}, Heri Wibowo ^a, Muhammad Imawan Badranaya ^a, Susilo Wisnugroho ^b

^a Departemen Teknik Mesin dan Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Yogyakarta

Jl. Mandung, Serut, Pengasih, Kec. Wates, Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta 55651

^b Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset dan Kawasan Sains dan Teknologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Jl. Karangsembung No.KM 19, Karangsembung, Kec. Karangsembung, Kabupaten Kebumen, Jawa Tengah 54353

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima 11 Juni 2025

Diterima setelah direvisi 13 Juni 2025

Disetujui 13 Juni 2025

Kata kunci:

Korosi Galvanik

Perpipaan

Rasio Area

Analisis Mikroskopis

Abstract-In this study, a report of the corrosion rate of the dissimilar material was influenced by the effect of high-temperature conditions. The implement of the single metal polarization on Tafel behavior and variations of the area of two dissimilar metals in the galvanic couple was explained. The technique was utilized to characterize corrosion, such as using the polarization resistance corrosion rate method and the Tafel method using a potentiostat. The material was used on a single carbon steel anode specimen and likewise used carbon steel and stainless steel 316 material couples in a galvanic corrosion and immersion environment. The surface area ratios were 1:2:10 used 3.5% NaCl solutions in a galvanic corrosion environment. The results of this analysis identified that the surface area involves the potentiodynamic polarization that can control the electrochemical of a surface. The anode in the galvanic couple is separated easily from its corrosion potential, and the magnitude of galvanic corrosion is highly influenced by the anodic to the cathodic area. The corrosion rate increased with the rising surface area either in galvanic and immersion conditions

Intisari-Dalam penelitian ini, laporan tentang laju korosi dari material yang berbeda dipengaruhi oleh efek kondisi suhu tinggi. Penerapan polaritas logam tunggal pada perilaku Tafel dan variasi area dua logam yang berbeda dalam pasangan galvanik dijelaskan. Teknik ini digunakan untuk mengkarakterisasi korosi, seperti menggunakan metode laju korosi resistansi polarisasi dan metode Tafel menggunakan potensiostat. Material yang digunakan pada spesimen anoda baja karbon tunggal dan juga digunakan pasangan material baja karbon dan stainless steel 316 dalam lingkungan korosi galvanik dan perendaman. Rasio luas permukaan adalah 1:2:10 menggunakan larutan NaCl 3,5% dalam lingkungan korosi galvanik. Hasil analisis ini mengidentifikasi bahwa luas permukaan melibatkan polarisasi potensi dinamis yang dapat mengendalikan elektro-kimia permukaan. Anoda dalam pasangan galvanik dapat dengan mudah dipisahkan dari potensi korosinya, dan besarnya korosi galvanik sangat dipengaruhi oleh area anodik dibandingkan dengan area katodik. Tingkat korosi meningkat seiring dengan bertambahnya luas permukaan baik dalam kondisi galvanik maupun rendaman.

1. Pendahuluan

Wadah tekanan yang dilapisi dengan baja karbon dengan ketebalan 3mm Cu telah diterapkan di saluran aliran bahan bakar nuklir. Percepatan korosi *carbon steel* (CS) akan terjadi jika tidak terdeteksi karena penghancuran lapisan Cu yang terpapar di lapisan CS ke lapisan di sekitar area air pribadi [1], [2]. Baja tahan karat memiliki sifat ketahanan korosi yang sangat berguna di lingkungan media korosif tertentu karena area film pasifnya yang lebih stabil. Namun, sifat ketahanan korosi baja tahan karat akan turun di medium bawah kondisi non-oksidasi pada suhu tinggi, terutama di lingkungan yang asam [3].

Beberapa logam dan paduan umum telah diuji oleh logam dalam seri galvanik dalam air laut perendaman [4], [5]. Dua logam yang berbeda diikat satu sama lain, laju penggerak untuk situasi korosi galvanik yang meningkat. Sifat anodik logam (aktif) berada di bagian paling atas dan yang katodik (mulia) berada di bagian paling bawah. Baik batangan padat maupun berlubang ditunjukkan untuk baja tahan karat. Dalam sebagian besar perlakuan, di mana logam yang berbeda digabungkan, sebuah batangan pasif (padat) harus digunakan untuk menentukan posisi baja tahan karat [6].

* Corresponding Author: Prihatno Kusdiyarto

E-mail: prihatnokusdiyarto@uny.ac.id (Prihatno Kusdiyarto)

Sebagai contoh, jika baja karbon atau seng (baja galvanis) yang merupakan elemen aktif dan dekat dengan posisi teratas dan baja tahan karat, logam mulia dan di bagian bawah daftar berada dalam kontak langsung dan di hadapan elektrolit cair, maka korosi galvanik akan terjadi jika mereka bersentuhan dan berisiko terhadap elektrolit. Ketika berhubungan dengan baja, saat mortar terkontaminasi klorin, kondisi korosi pada baja karbon memiliki kemungkinan tinggi untuk mengalami korosi galvanik yang meningkat. Namun, karena baja tahan karat bersifat pasif terhadap baja karbon, risiko korosi galvanik pada baja karbon berkurang secara signifikan seiring waktu[7].

Korosi adalah penurunan kualitas logam yang disebabkan oleh pengaruh lingkungan atau bahan kimia yang dapat mempengaruhi kondisi material, seperti *stainless steel*. Beberapa faktor tersebut mempengaruhi laju korosi, termasuk jenis larutan pencelup, durasi paparan terhadap efek korosi, suhu lingkungan, dan kelarutan oksigen dalam media korosi. Ketika dua logam atau paduan yang berbeda dicelupkan dalam larutan korosif atau secara teratur terkait dengan suhu kelembapan tertentu, maka setiap logam akan memiliki potensi untuk terjadinya korosi[8]. Jika korosi galvanik terjadi, semakin banyak logam mulia yang akan menjadi katoda, dan semakin banyak logam aktif yang akan menjadi anoda[9]. Ukuran arus dapat mengalir antara logam anoda dan katoda. Jika ini terjadi, laju korosi anoda pada lingkungan yang terpengaruh akan meningkat, dan laju korosi katoda akan menurun. Untuk meningkatkan korosi anoda disebut sebagai korosi galvanik.

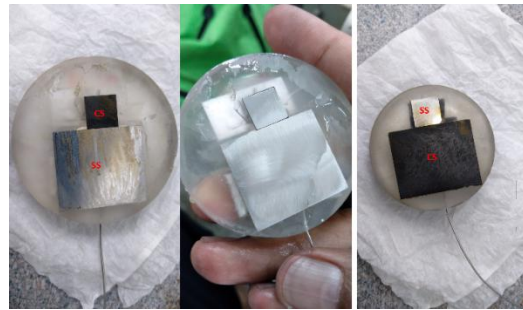
Besi karbon paduan dan baja tahan karat sering digunakan dalam bejana bertekanan yang terletak di stasiun pembangkit listrik nuklir, dan korosi galvanik terjadi ketika keduanya terpapar natrium klorida dan mempengaruhi keselamatan operasi[5], [10]. Setelah menggabungkan kedua logam yang berbeda ini dalam larutan natrium klorida, perilaku korosi dan perilaku korosi galvanik dipelajari menggunakan metode potensial rangkaian terbuka dan kurva polarisasi[11]. Hasilnya menunjukkan bahwa perbedaan sifat elektrokimia antara kedua logam membuat besi karbon bertindak sebagai anoda dan baja tahan karat bertindak sebagai katoda untuk membentuk pasangan galvanik yang mendorong terjadinya korosi galvanik. Dibandingkan dengan lingkungan korosif tunggal, laju korosi besi karbon meningkat secara signifikan di bawah korosi galvanik, dan komposisi oksida permukaan juga berubah[7]. Peningkatan konsentrasi larutan asam memperburuk korosi galvanik. Area anodik yang berlebihan dapat memperlambat arus korosi galvanik dan dengan cepat menstabilkan korosi.

Dalam studi ini, perilaku korosi galvanik dari sistem pasangan baja karbon dan baja stainless 316 dipelajari, dan efek rasio area terhadap korosi galvanik baja karbon dan baja stainless 316 yang dipasangkan diselidiki dengan menggunakan metode polaritas elektrokimia potensi dinamis dan analisis SEM

2. Metode Eksperimental

2.1 Komponen Material

Spesimen baja karbon/ *carbon steel* (CS) dan *stainless steel* (SS) dipotong menjadi panjang 10 mm×10 mm×3 mm, 10 mm×4 mm×3 mm, 50 mm×20 mm×3 mm; spesimen baja tahan karat 316 diproses menjadi ukuran 10 mm×10 mm×3 mm dan 10 mm×4 mm×3 mm. Spesimen tersebut digunakan untuk percobaan korosi galvanik. Bagian belakang spesimen dihubungkan dengan kawat dan disegel dengan bahan isolasi yang dibuat dari resin *epoxy*, meninggalkan permukaan sebagai elektroda kerja.



Gambar 1. Spesimen Pengujian

Semua spesimen dipoles dengan kertas amplas hingga ukuran grit 1500. Setelah itu, mereka dicuci dengan air deionisasi dalam lingkungan ultrasonik untuk menghilangkan kotoran permukaan dan dibersihkan dengan alkohol untuk menghilangkan minyak permukaan. Setelah dikeringkan dengan udara dingin, spesimen yang bersih ditempatkan di dalam kotak kering.

Tabel 1. Ukuran Sampel Dari Bahan Yang Dipilih Berdasarkan Rasio Area Yang Berbeda

Rasio Area	316 SS (mm)	Carbon Steel (mm)
1:1	10x10x3	10x10x3
1:2	10x10x3	20x10x3
2:1	20x10x3	10x10x3
1:10	10x10x3	50x20x3
CS mandiri	-	10x10x3
SS mandiri	10x10x3	-

2.2 Proses

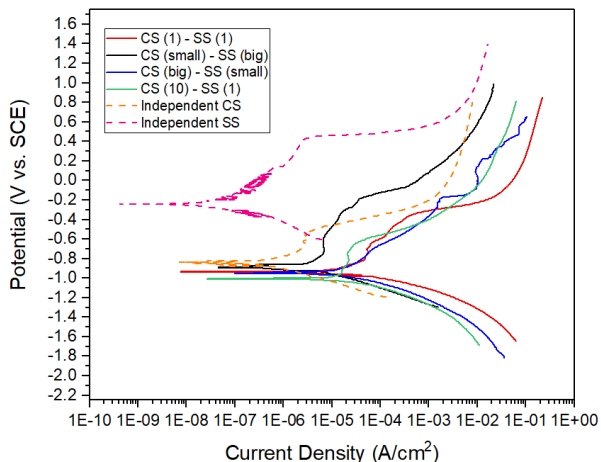
Eksperimen elektrokimia menggunakan proses tiga elektroda dan dilakukan dengan potentiostat. Elektroda referensi adalah elektroda kalomel jenuh (SCE), elektroda bantu adalah elektroda platinum, dan elektroda kerja adalah sampel. Semua potensial dalam standar didasarkan pada potensial SCE [12].

Eksperimen dilakukan dalam ruang air pada suhu 25 °C, dan sampel dicelupkan dalam larutan natrium klorida selama 7200 detik hingga potensi rangkaian terbuka (OCP) stabil secara signifikan. Pemindaian polaritas potensi dinamis dimulai dari -1000 hingga 1500 mV dengan laju pemindaian 5 mV/dtk [13].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Perbedaan antara potensial korosi memberikan kemungkinan terjadinya korosi galvanik, tetapi masih perlu mempertimbangkan polarisasi bahan logam dalam medium larutan korosif.



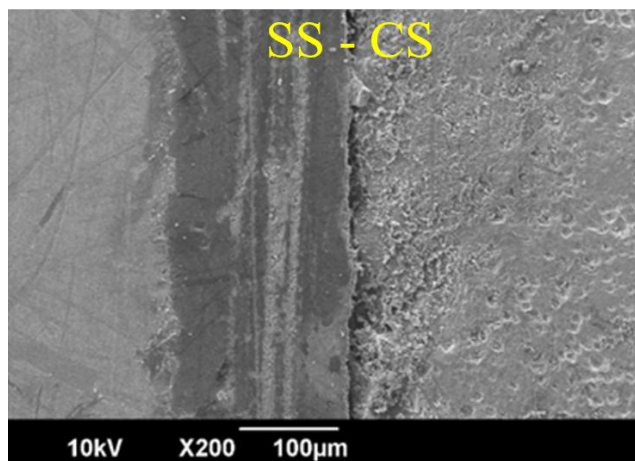
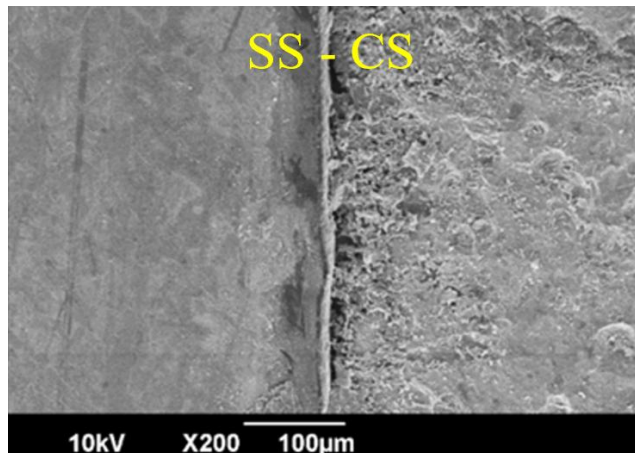
Gambar 2. Kurva Polarisasi Pasangan Galvanik Baja Karbon - Baja Tahan Karat 316 Dengan Rasio Luas Berbeda Serta Baja Karbon Dan Baja Tahan Karat 316 Secara Independent/ Mandiri.

Kurva polarisasi potensiodinamik dari baja karbon dan 316 setelah terendam dalam rasio area bahan yang berbeda pada suhu 25 °C ditunjukkan. Kerapatan arus korosi (I_{corr}) dan kerapatan arus pasifasi (I_p) dari sampel korosi dihitung dengan menggunakan metode ekstrapolasi linier Tafel. Baja karbon tidak memiliki zona pasifasi yang stabil pada konsentrasi larutan natrium klorida yang berbeda dapat diamati. Sebaliknya, 316 memiliki fenomena pasifasi selama proses polarisasi dengan rentang polarisasi anoda yang luas[14].

Tabel 2. Potensi korosi (E_{corr}) dan kepadatan arus korosi (I_{corr}) baja karbon dan stainless steel 316 dengan rasio area pasang galvanik yang berbeda dengan material CS dan SS independen dalam larutan natrium klorida 3,5%.

Rasio area galvanik SS-CS	E_{corr} (V)	I_{corr} (uA/cm ²)
1 : 1	-0,933	20,25
1 : 2	-0,989	3,297
2 : 1	-0,944	16,71
1 : 10	-1,010	136,6
CS mandiri	-0,838	0,4794
SS mandiri	-0,242	0,0295

Pada Gambar 3 menunjukkan hasil pengamatan struktur mikro dengan menggunakan SEM dari stainless steel 316 dan baja karbon setelah korosi galvanik pada suhu 25 °C dalam rasio area yang berbeda. Dapat dilihat dari gambar bahwa setelah korosi galvanik, permukaan baja karbon tampak ceroboh dan berpori, dan distribusi material tidak merata. Seiring meningkatnya konsentrasi larutan korosif, hasil produk korosi permukaan muncul.



Gambar 3. Gambar Hasil SEM Dari Pasangan Baja Tahan Karat 316 (SS) dan Baja Karbon (CS) Dalam Rasio Area yang Berbeda: Rasio 1:2, dan Rasio 1:10.

Permukaan korosi yang dimulai pada baja karbon diubah dari distribusi partikel menjadi distribusi kluster. Ini dapat diamati dari Gambar 3, sebagian besar produk korosi baja karbon adalah kluster struktur material, dan peningkatan konsentrasi larutan menyebabkan diameter dan volume partikel oksida meningkat. Sebagai perbandingan, permukaan baja stainless 316 bersifat seragam dan tebal, dan produk oksidasi sering kali merupakan struktur kubik dengan panjang yang berbeda [1].

3.2 Pembahasan

Hasil dari kurva polarisasi menunjukkan bahwa baja karbon tidak memiliki zona pasivasi yang stabil di semua larutan, dan fenomena polarisasi anoda terdeteksi pada 316 dalam larutan natrium klorida. Seiring dengan meningkatnya konsentrasi larutan, densitas arus pasivasi meningkat sedikit. Selama proses korosi, sebuah film pasivasi terbentuk di permukaan 316 untuk mengurangi laju korosi dan mencegah korosi [1].

Proses korosi galvanik dengan baja karbon dan 316 dalam larutan natrium klorida ditunjukkan pada gambar di atas. Logam yang bereaksi masuk ke dalam larutan natrium klorida sebagai ion atau ion terhidrasi dan menghasilkan kelebihan elektron pada permukaan logam yang dimasuki oleh anoda baja karbon dalam pasangan tersebut; ketika elektron mencapai katoda 316, mereka direndahkan oleh zat reduksi dalam larutan permukaan dan mengalami reaksi reduksi [15].

Hasil SEM mengungkapkan bahwa peningkatan rasio area yang berbeda membuat diameter dan volume partikel oksida di permukaan baja karbon (sebagai anoda) lebih besar dan memperkuat aglomerasi partikel. Produk komposisi korosi juga berubah. Baja karbon yang menunjukkan, retak dan menyebabkan kecelakaan keselamatan selama layanan dapat disebabkan oleh produk korosi dan cacat korosi yang dihasilkan selama korosi galvanik [16].

4. Simpulan

Dalam penyelidikan ini, efek baja karbon terhadap korosi tipe 316 SS di lingkungan natrium klorida pada rasio area yang berbeda telah dipelajari. Hasilnya menunjukkan bahwa baja karbon menunjukkan potensi korosi yang lebih positif dibandingkan dengan Tipe 316 SS di lingkungan natrium klorida. Perbedaan potensi yang signifikan menunjukkan bahwa korosi galvanik Tipe 316 SS dan baja karbon dapat terjadi dengan cepat dalam larutan natrium klorida. Kerapatan arus galvanik meningkat seiring dengan meningkatnya rasio area katoda/anoda, menunjukkan bahwa korosi Tipe 316 SS dalam natrium klorida dikendalikan dan dipercepat secara signifikan oleh pengikatan galvanik ke baja karbon. Meningkatnya rasio area juga mempercepat efek galvanik dari baja karbon pada Tipe 316 SS di lingkungan korosi galvanik. Tingkat korosi Tipe 316 SS dalam lingkungan korosi galvanik meningkat secara linier dengan meningkatkan rasio area katoda/anoda dalam isu-isu yang telah dipelajari.

Ketika rasio area katoda (316) dan anoda (baja karbon) adalah 1:1, 1:2, 2:1, dan 1:10, tegangan galvanik dan arus dari pasangan galvanik dalam konsentrasi larutan natrium klorida yang berbeda diungkapkan. Seiring berjalannya waktu reaksi, tegangan galvanik dan arus secara bertahap menjadi stabil, tetapi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kestabilan di bawah rasio area yang berbeda berbeda. Ketika area anod lebih besar, arus galvanik stabil lebih cepat. Pada tahap awal reaksi, permukaan logam dengan cepat membentuk film pasivasi dalam lingkungan korosi galvanik. Seiring pertumbuhan film pasivasi, laju korosi menurun, dan tegangan serta arus galvanik juga mencapai keseimbangan.

Ketika kehilangan natrium klorida atau perubahan lain terjadi, kedua logam ini secara terduga akan membentuk pasangan galvanik dan menyebabkan korosi galvanik. Saat ini, baja karbon sebagai logam anoda dapat menyebabkan pitting atau bahkan retak dalam waktu singkat, memulai kemungkinan bahaya keselamatan yang lebih serius. Kondisi ini harus segera diperiksa supaya jika dalam peralatan industry akan timbul dampak bahaya tersembunyi yang besar. Peningkatan area baja karbon yang berlebihan dapat menekan korosi galvanik tetapi mungkin tidak berlaku untuk kondisi operasi yang sebenarnya.

Referensi

- [1] T. E. Standish, L. J. Braithwaite, D. W. Shoesmith, and J. J. Noël, "Influence of Area Ratio and Chloride Concentration on the Galvanic Coupling of Copper and Carbon Steel," *J Electrochem Soc*, vol. 166, no. 11, pp. C3448–C3455, Jun. 2019, doi: 10.1149/2.0521911jes.
- [2] B. O. Okonkwo, H. Ming, F. Meng, J. Wang, X. Xu, and E.-H. Han, "Galvanic corrosion study between low alloy steel A508 and 309/308 L stainless steel dissimilar metals: A case study of the effects of oxide film and exposure time," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 548, p. 152853, May 2021, doi: 10.1016/j.jnucmat.2021.152853.
- [3] J. Tang, Z. Zhang, Y. Wang, P. Ju, Y. Tang, and Y. Zuo, "Corrosion resistance mechanism of palladium film-plated stainless steel in boiling H₂SO₄ solution," *Corros Sci*, vol. 135, pp. 222–232, May 2018, doi: 10.1016/j.corsci.2018.02.055.
- [4] Y. Wang *et al.*, "Effect of hydrostatic pressure on galvanic corrosion of low-alloy steel in simulated deep-sea environments," *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol. 57, no. 7, pp. 673–679, Oct. 2022, doi: 10.1080/1478422X.2022.2119006.
- [5] B. O. Okonkwo, H. Ming, F. Meng, J. Wang, X. Xu, and E.-H. Han, "Galvanic corrosion study between low alloy steel A508 and 309/308 L stainless steel dissimilar metals: A case study of the effects of oxide film and exposure time," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 548, p. 152853, May 2021, doi: 10.1016/j.jnucmat.2021.152853.
- [6] I. Carrillo, B. Valdez, R. Zlatev, M. Stoycheva, M. Schorr, and M. Carrillo, "Corrosion Inhibition of the Galvanic Couple Copper-Carbon Steel in Reverse Osmosis Water," *International Journal of Corrosion*, vol. 2011, pp. 1–7, 2011, doi: 10.1155/2011/856415.
- [7] J. Q. L. C. H. Z. C. L. Y. K. J. Y. W. X. D. C. X.G. Feng, "Galvanic Corrosion Between AISI304 Stainless Steel and Carbon Steel in Chloride Contaminated Mortars," *Int J Electrochem Sci*, pp. 5226–5233, Jun. 2016, doi: 10.20964/2016.06.24.
- [8] B. O. Okonkwo, H. Ming, F. Meng, J. Wang, X. Xu, and E.-H. Han, "Galvanic corrosion study between low alloy steel A508 and 309/308 L stainless steel dissimilar metals: A case study of the effects of oxide film and exposure time," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 548, p. 152853, May 2021, doi: 10.1016/j.jnucmat.2021.152853.
- [9] M. Oliveira, A. C. Bastos, S. Kallip, T. Hack, M. L. Zheludkevich, and M. G. S. Ferreira, "Corrosion inhibition and acceleration by rare earth ions in galvanic couples," *J Electrochem Soc*, vol. 166, no. 16, pp. C642–C648, 2019, doi: 10.1149/2.0761916jes.
- [10] C.-J. Wang, P. Kusdiyarto, and C.-Y. Chen, "Localized Depth of Galvanic Corrosion at Dissimilar Metal Welding A508/Inconel 182/316L," *Journal of Engineering Research*, Nov. 2022, doi: 10.36909/jer.18721.
- [11] C.-J. Wang, P. Kusdiyarto, and Y.-H. Li, "Potentiodynamic polarization analysis with various corrosion inhibitors on A508/IN-182/IN-52M/308L/316L welds," *Kuwait Journal of Science*, vol. 51, no. 2, p. 100202, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.kjs.2024.100202.
- [12] ASTM G82-98(2021)E1, "Standard Guide for Development and Use of a Galvanic Series for Predicting Galvanic Corrosion Performance," *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, pp. 1–7, 2021.
- [13] ASTM G71-81(2019), "Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes," *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA*, pp. 1–5, 2019.
- [14] M. Javidi, S. M. S. Haghshenas, and M. H. Shariat, "CO₂ corrosion behavior of sensitized 304 and 316 austenitic stainless steels in 3.5 wt.% NaCl solution and presence of H₂S," *Corros Sci*, vol. 163, p. 108230, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.corsci.2019.108230.
- [15] X. Ma, S. Zhang, W. Tan, and G. Zhu, "Fretting Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel Heat Exchanger Tube in NaCl Solution," in *Volume 4B: Materials and Fabrication*, American Society of Mechanical Engineers, Jul. 2022, doi: 10.1115/PVP2022-84442.

-
- [16] J. Shi, J. Ming, Y. Zhang, and J. Jiang, “Corrosion products and corrosion-induced cracks of low-alloy steel and low-carbon steel in concrete,” *Cem Concr Compos*, vol. 88, pp. 121–129, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.02.002.