

Analisis pengaruh inhibitor alami (ekstrak ampas kopi dan ampas kopi) terhadap laju korosi pada permukaan besi S45C berbasis citra gambar

Muhammad Ilyas, Muhammad Nasir, Hari Mukti, M. Padli Sandi, B. Budiana*

Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam

Jl. Ahmad Yani, Tlk. Tering, Kec. Batam Kota, Kota Batam, Kepulauan Riau 29461

*email: budiana@polibatam.ac.id

Abstrak – Logam merupakan jenis material yang sering digunakan untuk bahan konstruksi bangunan, perkapalan dan komponen elektronika. Salah satu bahan logam yang banyak digunakan adalah besi S45C. Besi S45C memiliki kekuatan yang cukup baik (570 – 700 MPa) dan tahan lama. Namun, besi ini mudah mengalami korosi. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan zat yang dapat menghambat laju korosi yang biasa disebut dengan inhibitor. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan ampas kopi dan ekstrak ampas kopi terhadap laju korosi pada besi S45C dengan menggunakan teknologi citra. Hasil penelitian menunjukan bahwa teknologi citra berhasil melakukan identifikasi luas korosi pada permukaan sampel besi S45C. Rata-rata laju korosi untuk sampel tanpa inhibitor bernilai 0,296 cm²/jam, rata-rata laju korosi untuk sampel ekstrak ampas kopi bernilai 0,086 cm²/jam dan rata-rata laju korosi untuk sampel ampas kopi bernilai 0,0795 cm²/jam. Dengan nilai rata-rata laju korosi tersebut terlihat bahwa penggunaan ampas kopi dan ekstrak ampas kopi dapat menurunkan laju korosi pada besi S45C.

Kata kunci: Besi S45C, inhibitor, kopi, teknologi citra.

Abstract – Metal is a material often used for building construction materials, shipping and electronic components. One of the widely used metal materials is S45C steel. S45C steel is durable and has good strength (570 - 700 MPa). However, this iron is prone to corrosion. Based on this, a substance that can inhibit the corrosion rate, commonly referred to as an inhibitor, is needed. This study aims to determine the effect of using coffee grounds and coffee grounds extract on the corrosion rate of S45C iron using image processing. The results showed that image technology successfully identified the corrosion area on the surface of S45C iron samples. The average corrosion rate for samples without inhibitor is 0.296 cm²/hour, the average corrosion rate for coffee grounds extract samples is 0.086 cm²/hour and the average corrosion rate for coffee grounds samples is 0.0795 cm²/hour. With the average value of the corrosion rate, it can be seen that using coffee grounds and coffee grounds extract can reduce the corrosion rate of S45C iron.

Keywords: Coffee, inhibitor, image processing, S45C steel.

PENDAHULUAN

Secara umum material di alam dapat digolongkan menjadi logam, semikonduktor, keramik, dan polimer. Logam merupakan material padat dan mampat dibandingkan semua jenis material lainnya sehingga memiliki struktur yang kuat dan kokoh. Dengan sifat tersebut, logam sering dipakai untuk konstruksi bangunan. Namun, logam cenderung mudah mengalami kerusakan akibat proses korosi [1].

Korosi merupakan proses perusakan logam akibat adanya interaksi dengan lingkungan. Ciri-ciri terjadinya proses korosi pada logam secara umum ditandai dengan adanya perubahan warna pada logam, terbentuknya material baru pada permukaan logam dan penurunan massa dari logam. Contoh-contoh kerusakan yang terjadi akibat korosi yang membahayakan manusia

seperti tumpahan minyak yang terjadi di Santa Barbara pada tahun 2015, Jatuhnya lampu lalu lintas kereta api di Newbury Inggris pada tahun 2014 dan pendaratan Jetsream yang jauh dari landasan pada tahun 2014 di Inggris [2].

Korosi merupakan peristiwa alam yang tidak dapat dicegah namun dapat dikendalikan dengan menggunakan rekayasa teknologi. Berbagai penelitian telah dilakukan oleh berbagai peneliti mulai dari pemilihan material yang digunakan, teknik pemasangan, pengontrolan lingkungan disekitar material yang digunakan, lapisan pelapisan permukaan logam yang digunakan sampai pada tahapan simulasi korosi berbasis pemrograman [3].

Salah satu contoh proses yang dapat dilakukan untuk mengendalikan korosi adalah penggunaan inhibitor [4], [5], [6]. Inhibitor merupakan zat yang dapat menurunkan laju

korosi pada logam. Berbagai peneliti telah melakukan penelitian terkait efektifitas penggunaan inhibitor pada material logam mulai dari inhibitor alami maupun inhibitor buatan. Berikut merupakan contoh-contoh inhibitor yang dikaji oleh berbagai peneliti yaitu Rabeprazole sulfid, Acetyl coumarine, Bromo acetyl coumarine, Rosa canina fruit extract, Lagerstroemia speciosa leaf extract [7], molybdate dan vanadate, coffee, ekstrak coffee [8], [9]. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, inhibitor yang telah digunakan mampu melapisi permukaan logam sehingga peristiwa korosi dapat dihambat lajunya.

Hal yang menarik untuk dijadikan kajian selanjutnya adalah potensi penggunaan ampas kopi sebagai inhibitor alami. Kopi merupakan salah satu komoditas pertanian di Indonesia yang jumlahnya cukup besar [10]. Selain dari itu, konsumsi kopi di Indonesia yang cukup tinggi menjadikan potensi ampas kopi yang dihasilkan juga cukup tinggi. Potensi ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan inhibitor selanjutnya. Beberapa peneliti yang telah mengembangkan ampas kopi sebagai inhibitor yaitu penggunaan ekstrak kafein ampas kopi sebagai inhibitor besi [11], [12], [13]. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh hasil bahwa laju korosi berkurang akibat penggunaan inhibitor yang digunakan.

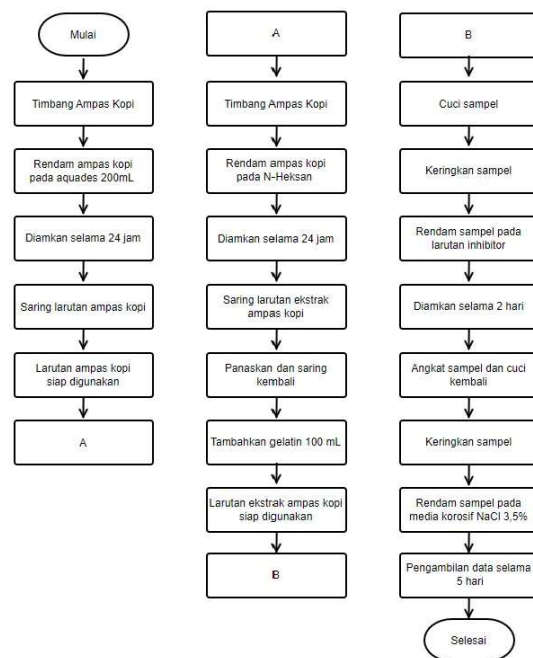
Teknik identifikasi proses korosi pada permukaan logam dapat dilakukan dengan menggunakan SEM (*Scanning electron microscopy*). Dengan analisis SEM tersebut, peneliti dapat melihat lapisan pelindung permukaan logam akibat penggunaan inhibitor yang digunakan. Selain dengan menggunakan SEM, identifikasi korosi pada permukaan logam dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi citra [5], [14], [14], [15].

Penggunaan analisis gambar pada permukaan logam telah diteliti oleh beberapa peneliti seperti pendekatan *image processing* dan *computer vision* dalam mendeteksi korosi [16], penggunaan *automated image processing* sebagai deteksi pada struktur besi [17] dan pengolahan gambar untuk kuantifikasi korosi pada pelat beton menggunakan data GPR [18]. Penelitian-penelitian yang telah dilakukan telah berhasil mempelajari peristiwa-peristiwa korosi dan identifikasi proses yang terjadi. Namun, penggunaan teknologi citra gambar yang telah dilakukan belum dimanfaatkan secara maksimal dalam mempelajari penggunaan inhibitor.

Berdasarkan hal tersebut, peneliti pada artikel ini akan mengkaji pengaruh penggunaan kopi dan ekstrak ampas kopi terhadap laju korosi pada permukaan besi S45C. Identifikasi yang dilakukan adalah dengan menggunakan teknologi citra.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di laboratorium kimia, jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam. Eksperimen dilakukan selama 4 bulan (Mei-Agustus) 2024. Secara garis besar penelitian dilakukan melalui tahapan sebagai berikut (**Gambar 1**).



Gambar 1. Metode penelitian

Secara detail, metode penelitian dapat dideskripsikan sebagai berikut:

Persiapan Baja S45C

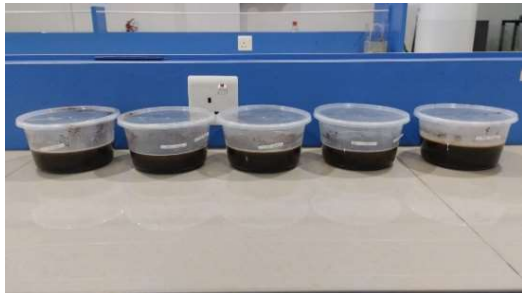
Besi S45C dipotong dengan bentuk lingkaran. Ukuran diameter besi sebesar 7 cm dan dipersiapkan sejumlah 14 buah. Sampel besi yang telah diukur kemudian sampel dipotong menggunakan mesin potong gerinda. Matriks penelitian untuk sampel disajikan pada **Tabel 1**. **Tabel 1** menunjukkan variasi inhibitor yang digunakan, jumlah gram ampas kopi yang digunakan, abrasive paper yang digunakan serta pemberian kode sampel untuk masing-masing perlakuan penelitian.

Tabel 1. Matriks penelitian

Inhibitor	Jumlah (gram)	Abrasif Paper	Kode Sampel
Ampas Kopi	100	120	AM10A
		320	AM10B
	150	120	AM15A
		320	AM15B
	200	120	AM20A
		320	AM20B
Ekstrak Ampas Kopi	100	120	EM10A
		320	EM10B
	150	120	EM15A
		320	EM15B
	200	120	EM20A
		320	EM20B
Tanpa Inhibitor	-	120	NAE12
		320	NAE32

Persiapan Ampas Kopi

Ampas kopi ditimbang sebanyak 100 gram, 150 gram dan 200 gram. Masing-masing ampas kopi dilarutkan dalam 200 ml aquades. Larutan yang terbentuk kemudian dituang kedalam wadah tertentu. Sampel besi S45C dimasukan kedalam wadah yang mengandung larutan ampas kopi sesuai dengan takaran yang telah ditentukan selama 24 Jam. Berikut merupakan persiapan larutan ampas kopi (**Gambar 2**).



Gambar 2. Sampel direndam pada larutan ampas kopi

Persiapan Ekstrak Ampas Kopi

Ampas kopi ditimbang sebanyak 100 gram, 150 gram dan 200 gram. Ampas kopi 100 gram dilarutkan pada 1000 ml N-Heksana, ampas kopi 150 gram dilarutkan pada 1500 ml N-Heksana dan ampas kopi 200 gram pada 2000 ml N-Heksana. Larutan yang terbentuk kemudian dituang kedalam wadah tertentu. Sampel besi S45C dimasukan kedalam wadah yang mengandung larutan ekstrak ampas kopi

sesuai dengan takaran yang telah ditentukan selama 24 Jam (**Gambar 3**).



Gambar 3. Sampel direndam pada larutan ekstrak ampas kopi

Pengolahan Citra Sampel

Tahapan pada metode pengolahan citra dimulai dengan *input image* (BGR). Kemudian mengubah *input image* (BGR) menjadi gambar skala abu-abu (*Greyscale*). Hal ini bertujuan untuk mengubah nilai dari input image (BGR) menjadi 8-bit (255). Setelah itu, dilakukan *adjust thresholding* untuk mengubah gambar skala abu-abu (*greyscale*) menjadi citra biner. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan objek yang tidak teridentifikasi korosi. Kemudian dilakukan operasi morfologi yang bertujuan untuk menghilangkan citra yang tidak diinginkan dan juga menebalkan citra yang terdeteksi korosi. Setelah itu, dilakukan perhitungan pixel yang teridentifikasi korosi. Langkah terakhir adalah mengubah jumlah pixel yang teridentifikasi korosi menjadi satuan cm.

Pengolahan Data dan Analisis yang digunakan

Metode analisis yang digunakan adalah metode pengolahan citra dengan membandingkan hasil dari citra menggunakan *filtering* untuk melihat tingkat korosi yang terdapat pada setiap permukaan sampel dan *thresholding* untuk mengklasifikasikan tingkat korosi. Penafsiran data diperoleh dari gambar permukaan sampel besi yang tertangkap oleh vision. Permukaan gambar besi tersebut kemudian diolah dengan menggunakan teknik citra gambar untuk ditentukan nilai laju korosinya dan dibandingkan dengan data laju korosi berdasarkan perhitungan berat/gravimetri.

HASIL DAN PEMBAHASAN

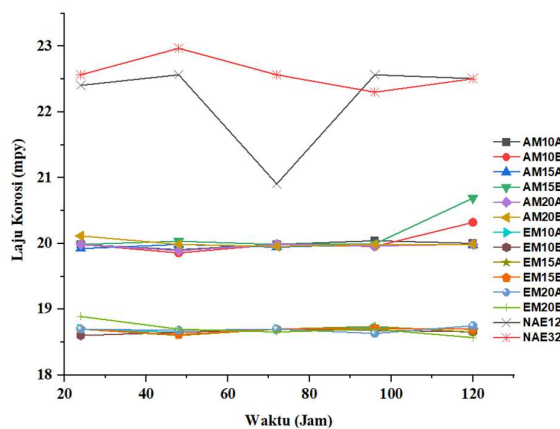
Perhitungan Laju Korosi dengan metode berat

Perhitungan berat untuk semua sampel dilakukan mulai dari tahapan perhitungan massa sampel sebelum direndam pada larutan 3.5% NaCl sampai perhitungan massa sampel setelah dilakukan perendaman pada larutan 3.5% NaCl selama 120 Jam. Perhitungan Laju korosi mengacu pada persamaan (1).

$$MPY = \frac{534 W}{D A T} \text{ (mill per year)} \quad (1)$$

dengan W kehilangan berat (mg), D berat jenis (gr/cm^3), A Luas benda uji (cm^2), dan T waktu (jam).

Hasil perhitungan laju korosi dengan menggunakan rumus 1 disajikan pada gambar 4.



Gambar 4. Hubungan antara laju korosi dengan waktu perendaman (metode pengukuran berat)

Berdasarkan Gambar 4, sampel NAE12 dan NAE32 memiliki laju korosi tertinggi dibandingkan dengan semua sampel. Ini menunjukkan bahwa ampas kopi dan ekstrak ampas kopi mengurangi laju korosi pada besi S45C. Selain dari itu, kurva yang terbentuk pada gambar 1 terbagi menjadi 3 pola yaitu pola bagian atas (non-inhibitor), pola tengah (kelompok inhibitor ampas kopi) dan pola bawah (kelompok inhibitor ekstrak ampas kopi). Tiga pola yang terbentuk menunjukkan nilai laju korosi yang berbeda ketika diberikan perlakuan yang berbeda. Laju korosi pada sampel yang diberi ekstrak ampas kopi terlihat memiliki nilai yang lebih rendah jika dibandingkan dengan

sampel yang diberi ampas kopi dan sampel yang tidak diberi inhibitor.

Perhitungan laju korosi dengan menggunakan teknologi citra gambar

Langkah pertama yang dilakukan untuk mendapatkan laju korosi dari setiap sampel adalah perhitungan luas daerah terkorosi. Luas sampel yang terkorosi diperoleh dengan menggunakan persamaan (2) sebagai berikut:

$$Area = \frac{(Area \text{ terdeteksi} \times \text{nilai kalibrasi})}{(\text{nilai resolusi})} \quad (2)$$

Nilai kalibrasi diperoleh dari diameter sampel dibagi dengan jarak dalam pixel pada gambar. Sehingga nilai kalibrasi mempresentasikan nilai pixel dalam nilai cm tertentu. Nilai resolusi diperoleh dari jarak dalam pixel pada gambar dibagi dengan diameter sample. Sehingga nilai resolusi mempresentasikan nilai cm pada pixel tertentu. Sedangkan untuk perhitungan laju korosi untuk semua sampel menggunakan persamaan (3) sebagai berikut:

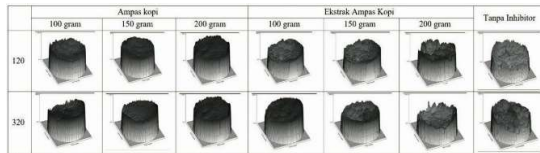
$$\text{Laju korosi} = \frac{\text{luas daera terkorosi}}{\text{waktu korosi}} \quad (3)$$

Luas daerah terkorosi dapat diketahui dengan analisis gambar permukaan besi S45C. Berikut merupakan contoh perhitungan luas daerah terkorosi (**Gambar 5**).



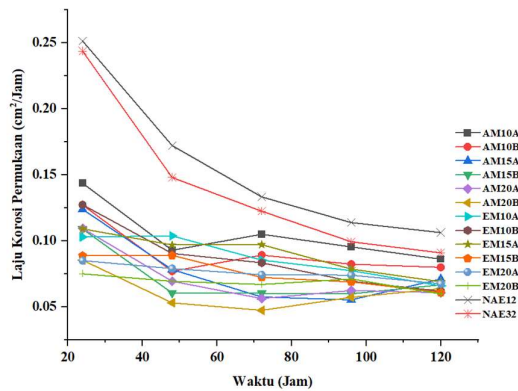
Gambar 5. Identifikasi luas daerah terkorosi

Surface plot ditunjukkan pada Gambar 6. Sampel *surface plot* terlihat memiliki gambar permukaan yang kasar terutama untuk sampel tanpa inhibitor.



Gambar 6. Surface plot permukaan besi S45C

Setelah diketahui luas permukaan sampel maka dilakukan perhitungan laju korosi. Adapun hasilnya disajikan pada (Gambar 6).

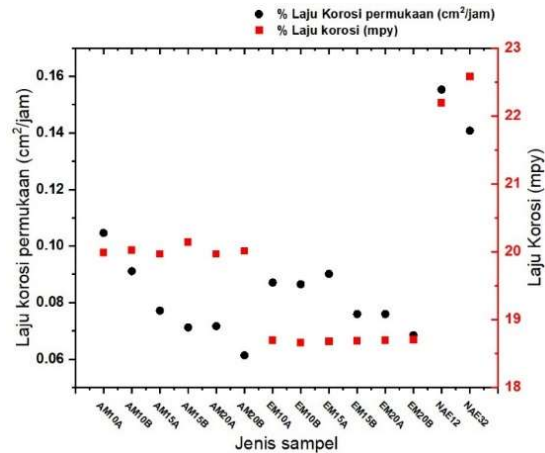


Gambar 6. Hubungan antara laju korosi dengan waktu perendaman (analisis citra permukaan)

Berdasarkan Gambar 6, laju korosi tertinggi dimiliki sampel NAE12 dan NAE32 (sama polanya seperti pada gambar 3). Semua sampel yang diberikan inhibitor terlihat memiliki laju korosi permukaan yang lebih rendah. Tidak seperti pada gambar 3 yang membentuk tiga pola atau tiga group. Semua sampel yang diberi inhibitor terlihat *over laping* satu sama lain. Namun secara umum, rata-rata laju korosi untuk sampel tanpa inhibitor bernilai 0,296 cm²/jam, rata-rata laju korosi untuk sampel ekstrak ampas kopi bernilai 0,086 cm²/jam dan rata-rata laju korosi untuk sampel ampas kopi bernilai 0,0795 cm²/jam.

Perbandingan laju korosi dengan menggunakan metode berat dan dengan menggunakan citra gambar

Berdasarkan Gambar 7 terlihat perbandingan nilai laju korosi permukaan yang diperoleh dengan menggunakan teknologi citra dengan laju korosi menggunakan perhitungan berat. Kurva yang terbentuk memiliki pola yang relative sama satu sama lain, misalnya dapat dilihat untuk sampel EM10A-EM20B. Kurva terlihat membentuk satu garis lurus. Namun kurva terlihat berbeda untuk sampel AM10A-AM20B.



Gambar 7. Perbandingan laju korosi permukaan (cm²/jam) dengan laju korosi (mpy)

Untuk laju korosi permukaan, terlihat nilainya linier negativ namun untuk laju korosi dengan perhitungan berat, pola yang terbentuk untuk sampel AM (Ampas Kopi) terlihat relatif konstan. Dengan kondisi tersebut, maka nilai rata-rata laju korosi untuk semua sampel diperlukan seperti yang telah dihitung sebelumnya pada nilai rata-rata laju korosi.

Hasil penelitian kami menguatkan teori-teori sebelumnya bahwa potensi inhibitor alami yang digunakan dapat menurunkan laju korosi pada logam [11], [12], [13]. Selain dari itu, Tim penelitian kami telah berhasil mengidentifikasi korosi dengan menggunakan teknologi citra dengan menggunakan teknologi citra dengan menggunakan metode Scanning Electron microscopy (SEM), Gravimetri dan Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) [19], [20] dan bahkan menggunakan citra gambar dengan ruang lingkup yang berbeda. Penggunaan metode yang dilakukan menunjukkan pola yang sama yaitu inhibitor alami dapat mengurangi laju korosi pada logam.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, teknologi citra gambar telah berhasil menganalisis korosi pada permukaan sampel besi S45C. Dengan teknologi citra gambar, luas daerah yang telah mengalami korosi dapat diketahui. Luas daerah korosi tersebut menjadi dasar perhitungan dalam penentuan laju korosi sampel baja S45C. Rata-rata laju korosi untuk sampel tanpa inhibitor bernilai 0,296 cm²/jam, rata-rata laju korosi untuk sampel ekstrak ampas kopi bernilai 0,086 cm²/jam dan rata-rata laju

korosi untuk sampel ampas kopi bernilai 0,0795 cm²/jam. Berdasarkan nilai rata-rata laju korosi tersebut, penggunaan inhibitor alami ampas kopi dan ekstrak ampas kopi dapat menurunkan laju korosi pada permukaan Besi S45C. Namun, kajian yang dilakukan memiliki limitasi penelitian seperti variabel temperatur, kelembapan dan intensitas cahaya. Sehingga, peneliti merekomendasikan untuk kajian selanjutnya untuk dapat melakukan kajian terhadap faktor-faktor yang tidak dikaji pada penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada institusi yang telah memberikan dukungan penuh dalam pelaksanaan kajian ini. Secara khusus, kami ingin menyampaikan apresiasi kepada Politeknik Negeri Batam atas bantuan yang berharga dalam menyediakan fasilitas yang diperlukan. Kami juga menyampaikan rasa terima kasih kepada DIT. APTV yang telah memberikan hibah penelitian yang sangat membantu dalam merealisasikan penelitian ini. Dukungan finansial dan material yang diberikan sangat berperan dalam keberhasilan penelitian ini. Ucapan terima kasih ini juga kami sampaikan kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi secara langsung maupun tidak langsung dalam pelaksanaan kajian ini. Terima kasih atas segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Wu, W. Zhao, and L. Wang, "State of the art and current trends on the metal corrosion and protection strategies in deep sea," *J Mater Sci Technol*, vol. 215, pp. 192–213, Apr. 2025.
- [2] Z. Petrovic, "Catastrophes caused by corrosion," *Vojnotehnički Glasnik*, vol. 64, no. 4, pp. 1048–1064, 2016.
- [3] S. Harsimran, K. Santosh, and K. Rakesh, "Overview Of Corrosion And Its Control: A Critical Review," *Proceedings on Engineering Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 13–24, 2021.
- [4] R. Aslam, M. Mobin, S. Zehra, and J. Aslam, "A Comprehensive Review Of Corrosion Inhibitors Employed To Mitigate Stainless Steel Corrosion In Different Environments," *J Mol Liq*, vol. 364, p. 119992, Oct. 2022.
- [5] P. D. Desai, C. B. Pawar, M. S. Avhad, and A. P. More, "Corrosion inhibitors for carbon steel: A review," *Vietnam Journal of Chemistry*, vol. 61, no. 1, pp. 15–42, Feb. 2023.
- [6] I. A. W. Ma, S. Ammar, S. S. A. Kumar, K. Ramesh, and S. Ramesh, "A Concise Review On Corrosion Inhibitors: Types, Mechanisms And Electrochemical Evaluation Studies," *Journal of Coatings Technology and Research*, vol. 19, no. 1, pp. 241–268, Nov. 2021.
- [7] S. KM, B. M. Praveen, and B. K. Devendra, "A Review On Corrosion Inhibitors: Types, Mechanisms, Electrochemical Analysis, Corrosion Rate And Efficiency Of Corrosion Inhibitors On Mild Steel In An Acidic Environment," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 16, p. 100258, Aug. 2024.
- [8] E. Cesar, C. Assumpção De Souza, B. De Andrade Ripper, D. Perrone, and E. D'elia, "Roasted Coffee Extracts as Corrosion Inhibitors for Mild Steel in HCL Solution," *Materials Research*, vol. 19, no. 6, pp. 1276–1285, Sep. 2016.
- [9] S. Elhady, E. G. Zaki, O. E. El-Azabawy, and I. S. Fahim, "Electrochemical evaluation of green corrosion inhibitor based on ground coffee waste in Petroleum fields," *Results in Engineering*, vol. 21, p. 101880, Mar. 2024.
- [10] D. P. Ramadhani1 and P. Perdana, "Potensi Komoditas Kopi Indonesia Pada Pasar Asean Dengan Malaysia Sebagai Negara Tujuan Ekspor," *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, vol. 9, no. 21, pp. 197–205, Nov. 2023.
- [11] Y. Maryanty, A. D. Ifvournamasari, K. Widjajanti, D. R. Wulan, and N. I. Azkiya, "Pengaruh ekstrak kafein sebagai inhibitor laju korosi dan efisiensi inhibisi pada baja dalam larutan asam sulfat dan biosolar," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 17, no. 1, pp. 66–70, Jun. 2023.
- [12] D. Afrilia, S. Bahri, J. Jalaluddin, M. Masrullita, and N. ZA, "Pengaruh Konsentrasi Ekstrak Kopi Sebagai Inhibitor

- Terhadap Laju Korosi Pada Baja,” *Chemical Engineering Journal Storage*, vol. 1, no. 4, pp. 111–120, Apr. 2022.
- [13] F. A. Zahra, B. Aliyah, and L. O. Nurhadi, “Ekstrak Kafein Ampas Kopi Sebagai Inhibitor Korosi Baja Murni Dalam Media H₂SO₄,” *Prosiding Semnastek*, vol. 0, no. 0, Nov. 2019.
- [14] S. Fonna, I. Bin M. Ibrahim, Gunawarman, S. Huzni, M. Ikhsan, and S. Thalib, “Investigation of corrosion products formed on the surface of carbon steel exposed in Banda Aceh’s atmosphere,” *Heliyon*, vol. 7, no. 4, p. e06608, Apr. 2021.
- [15] Y. Hoshi, Y. Otake, K. Kito, G. Pantazopoulos, and A. Vazdirvanidis, “Identification of corrosion and damage mechanisms by using scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray microanalysis: contribution to failure analysis case histories,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 55, no. 1, p. 012015, Mar. 2014.
- [16] A. A. I. M. Ali et al., “Computer Vision and Image Processing Approaches for Corrosion Detection,” *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 11, Page 1954, vol. 11, no. 10, p. 1954, Oct. 2023.
- [17] M. Khayatazad, L. De Pue, and W. De Waele, “Detection of corrosion on steel structures using automated image processing,” *Developments in the Built Environment*, vol. 3, p. 100022, Aug. 2020.
- [18] N. D. Hoang, “Image Processing-Based Pitting Corrosion Detection Using Metaheuristic Optimized Multilevel Image Thresholding and Machine-Learning Approaches,” *Math Probl Eng*, vol. 2020, 2020.
- [19] R. De Motte et al., “A study by electrochemical impedance spectroscopy and surface analysis of corrosion product layers formed during CO₂ corrosion of low alloy steel,” *Corros Sci*, vol. 172, p. 108666, Aug. 2020.
- [20] A. C. Lazanas and M. I. Prodromidis, “Electrochemical Impedance Spectroscopy—A Tutorial,” *ACS Measurement Science Au*, vol. 3, no. 3, pp. 162–193, Jun. 2023.