

Korosi Mikroba pada Infrastruktur Logam: Tantangan dan Strategi Pengelolaan Berkelanjutan

Yenni Ciawi^{1*}, Yan Ramona²

¹Program Doktor Ilmu Teknik, Universitas Udayana, Denpasar, Indonesia

²Jurusan Biologi, FMIPA, Universitas Udayana, Bukit Jimbaran, Badung, Indonesia

*yenniciawi@unud.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15-8-2024

Revised: 13-9-2024

Accepted: 22-9-2024

Available online: 25-10-2024

ABSTRAK

Korosi mikroba (MIC, *microbiologically influenced corrosion*) merupakan tantangan serius di berbagai industri, termasuk industri minyak dan gas, infrastruktur kelautan, serta instalasi pengolahan air, karena aktivitas mikroba yang mempercepat degradasi logam secara signifikan. MIC disebabkan oleh bakteri, arkea, dan jamur yang membentuk *biofilm* pada logam, memicu reaksi elektrokimia lokal yang menyebabkan korosi. Tulisan ini berfokus pada mikroorganisme utama seperti bakteri pereduksi sulfat (SRB, *sulfate-reducing bacteria*), bakteri pengoksidasi besi (IOB, *iron-oxidizing bacteria*), dan metanogen, serta faktor lingkungan, termasuk oksigen, nutrisi, pH, suhu, dan salinitas, yang mendukung pertumbuhan mikroba dan mempercepat korosi. Selain itu, berbagai metode deteksi MIC dievaluasi, seperti analisis mikrobiologi, spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS, *electrochemical impedance spectroscopy*), uji non-destruktif, serta sensor *real-time*. Strategi mitigasi mencakup material tahan korosi, pelapis antimikroba, biosida, dan perlindungan katodik, dengan fokus pada teknologi baru seperti pelapis pintar (*self-healing*), nanomaterial, dan sistem bioelektrokimia yang menawarkan solusi berkelanjutan. Sangat penting dilakukan penelitian lanjutan mengenai pengembangan pelapis pintar yang lebih hemat biaya dan efisien, dampak lingkungan jangka panjang dari nanomaterial, serta pengoptimalan sistem bioelektrokimia agar efektif di berbagai kondisi. Dengan mengintegrasikan metode deteksi dan mitigasi, industri dapat melindungi infrastruktur penting dari dampak jangka panjang korosi mikroba dan mengurangi secara signifikan biaya akibat kerusakan oleh MIC.

KATA KUNCI: bakteri pereduksi sulfat (SRB); *biofilm*; korosi mikroba (MIC); mitigasi korosi; spektroskopi impedansi elektrokimia (EIS)

ABSTRACT

Microbiologically influenced corrosion (MIC) poses a significant challenge across various industries, including the oil and gas sector, marine infrastructure, and water treatment facilities, due to microbial activity that significantly accelerates metal degradation. MIC is caused by bacteria, archaea, and fungi that form biofilms on metal surfaces, triggering localized electrochemical reactions leading to corrosion. This paper focuses on key microorganisms such as sulfate-reducing bacteria (SRB), iron-oxidizing bacteria (IOB), and methanogens, as well as environmental factors, including oxygen, nutrients, pH, temperature, and salinity, which support microbial growth and exacerbate corrosion. Furthermore, various MIC detection methods are evaluated, including microbiological analysis, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), non-destructive testing, and real-time sensors. Mitigation strategies include corrosion-resistant materials, antimicrobial coatings, biocides, and cathodic protection, with a focus on emerging technologies such as self-healing coatings, nanomaterials, and bioelectrochemical systems that offer sustainable solutions. Further research is crucial to developing more cost-effective and efficient self-healing coatings, understanding the long-term environmental impacts of nanomaterials, and optimizing bioelectrochemical systems for effectiveness under diverse conditions. By integrating detection and mitigation methods, industries can protect critical infrastructure from the long-term impacts of MIC and significantly reduce costs associated with MIC-related failures.

KEYWORDS: biofilm formation; corrosion mitigation; electrochemical impedance spectroscopy (EIS); microbiologically influenced corrosion (MIC); sulfate-reducing bacteria (SRB)



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

1. PENDAHULUAN

Korosi merupakan proses elektrokimia yang menyebabkan kerusakan logam akibat paparan lingkungan, dan menjadi masalah kritis di berbagai industri, seperti minyak dan gas, infrastruktur kelautan, dan sistem pengolahan air [1, 2, 3]. Jenis-jenis korosi utama yang umum ditemukan meliputi korosi umum, korosi galvanik, korosi stres korosi (SCC, *stress corrosion cracking*), korosi *fretting*, dan korosi mikroba (MIC, *microbiologically influenced corrosion*) [4]. Korosi dapat mengakibatkan kerusakan struktural yang parah, bahaya keselamatan, dan biaya finansial yang signifikan akibat perbaikan, waktu henti, dan kegagalan aset [5]. Salah satu bentuk korosi yang sangat mengkhawatirkan adalah korosi mikroba (MIC), mikroorganisme seperti bakteri, arkea, dan jamur menyebabkan dan mempercepat korosi. MIC terutama terjadi di lingkungan tempat *biofilm* atau lapisan lendir sel mikroba, yang terbentuk pada permukaan logam, menginduksi perubahan kimia setempat yang menyebabkan korosi parah [6, 7]. Lingkungan yang menjadi tempat umum terjadinya MIC meliputi pipa minyak, infrastruktur kelautan, dan fasilitas pengolahan air limbah, tempat mikroorganisme berkembang biak dan mempercepat degradasi material [1, 8, 9].

Meskipun kesadaran tentang MIC semakin meningkat, sifatnya yang tidak dapat diprediksi dan interaksinya yang kompleks dengan lingkungannya membuatnya sulit untuk dikendalikan. MIC tidak hanya mengakibatkan kegagalan struktural, tetapi juga berdampak negatif terhadap lingkungan, contohnya adalah tumpahan minyak dari pipa yang terkorosi. Hal ini menimbulkan kerugian ekonomi dan ekologi, yang membutuhkan teknik deteksi dan mitigasi yang lebih canggih [10]. Industri yang bergantung pada infrastruktur logam perlu memahami lingkup dan dampak MIC [11]. Tulisan ini membahas berbagai mikroorganisme yang terlibat dalam MIC, menjelaskan mekanisme terjadinya korosi, dan menganalisis kondisi lingkungan yang berkontribusi pada pertumbuhannya.

Akhir-akhir ini, ditemukan teknologi mitigasi inovatif sebagai solusi jangka panjang yang lebih berkelanjutan untuk pengelolaan MIC. Pelapis pintar (*self-healing coatings*) mampu memperbaiki kerusakan mikro pada lapisan pelindung secara otomatis, untuk mencegah korosi lebih lanjut [12], [13]. Selain itu, material nano, seperti partikel nano perak atau tembaga, dapat menghambat pembentukan biofilm dan melindungi permukaan logam dari aktivitas mikroba [10]. Sistem bioelektrokimia memanfaatkan interaksi antara mikroorganisme dan permukaan elektroda untuk mengurangi laju korosi melalui mekanisme biofilm yang terkendali [12]. Teknologi-teknologi ini menawarkan pendekatan baru yang tidak hanya fokus pada perlindungan logam, tetapi juga berpotensi untuk mengintegrasikan pengelolaan MIC dengan produksi energi atau aplikasi lainnya.

Dengan perkembangan teknologi ini, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengintegrasikan metode deteksi dan mitigasi yang lebih efektif dalam mengurangi dampak jangka panjang MIC. Ulasan ini bertujuan untuk memberikan pemahaman menyeluruh tentang mikroorganisme penyebab MIC, faktor lingkungan pendukung, serta solusi teknologi yang tersedia dan potensial untuk mengatasi MIC secara lebih efisien dan berkelanjutan.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan tinjauan literatur sistematis untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan mensintesis informasi yang berkaitan dengan korosi mikroba (MIC). Basis data utama yang digunakan meliputi Google Scholar, PubMed, dan ScienceDirect. Fokus pencarian adalah artikel-artikel yang diterbitkan dalam dua dekade terakhir. Kata kunci seperti *microbiologically influenced corrosion*, metode deteksi MIC, *biofilm*, dan mitigasi korosi diterapkan untuk mempersempit pencarian terhadap penelitian yang relevan.

Pemilihan artikel didasarkan pada beberapa kriteria. Pertama, hanya studi yang secara spesifik membahas kontribusi mikroorganisme terhadap korosi yang diikutsertakan, terutama mikroorganisme seperti bakteri pereduksi sulfat (SRB), bakteri pengoksidasi besi (IOB), dan metanogen. Ke dua, makalah mengenai berbagai metode deteksi dan mitigasi korosi mikroba, termasuk teknik elektrokimia, uji non-destruktif, serta teknologi sensor canggih, diprioritaskan. Ke tiga, makalah tentang studi kasus nyata dari berbagai industri, seperti minyak dan gas, infrastruktur kelautan, serta pengolahan air, juga dimasukkan dalam kajian ini. Selain itu, sumber

tambahan berupa buku dan artikel *review* mengenai mekanisme MIC dan perkembangan teknologi terbaru juga diikutkan untuk memperluas cakupan bahasan. Data dari studi-studi yang terpilih dianalisis secara mendalam untuk mengidentifikasi pola yang muncul, tren terbaru, serta kesenjangan dalam penelitian saat ini, untuk memberikan pemahaman komprehensif tentang dampak mikroba terhadap korosi dan strategi mitigasi yang dapat diterapkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Mikroorganisme yang Terlibat dalam MIC

Mikroorganisme yang menyebabkan MIC membentuk *biofilm* yang beragam dan sangat tangguh pada permukaan logam, mengubah komposisi kimia setempat dan mempercepat korosi melalui reaksi elektrokimia [2]. Bakteri pereduksi sulfat (SRB) adalah salah satu kontributor MIC yang paling signifikan, terutama di lingkungan anaerob seperti pipa laut dalam, reservoir minyak, dan pada infrastruktur pembuangan air limbah [9, 12]. SRB berkembang biak dengan mereduksi ion sulfat (SO_4^{2-}) menjadi hidrogen sulfida (H_2S), zat yang sangat korosif yang bereaksi dengan besi dan baja, membentuk endapan besi sulfida (FeS). Endapan ini mempercepat korosi *pitting* setempat, yang melemahkan struktur logam dan meningkatkan kemungkinan kegagalan mendadak [13, 14].

Bakteri pengoksidasi besi (IOB), di sisi lain, adalah organisme aerob yang mempercepat korosi di lingkungan yang kaya oksigen, seperti di instalasi pengolahan air dan lingkungan laut [17]. IOB memperoleh energi dengan mengoksidasi besi ferro (Fe^{2+}) menjadi besi ferri (Fe^{3+}), menghasilkan ferri hidroksida (karat), yang menumpuk di permukaan logam. Proses ini tidak hanya menyebabkan korosi umum, tetapi juga menyebabkan kerusakan setempat dengan menciptakan titik-titik aerob diferensial (*differential aeration cells*), yaitu deplesi/kekurangan oksigen di bawah lapisan *biofilm* yang menyebabkan *pitting*/lubang yang parah [15, 16, 17].

Metanogen, kelompok mikroba lain yang terlibat dalam MIC, umumnya ditemukan di lingkungan anaerob. Meskipun metana sendiri tidak bersifat korosif, metanogen mengganggu sistem perlindungan katodik dengan mengonsumsi hidrogen, mencegah pembentukan lapisan pelindung hidrogen pada logam, yang mempercepat pelarutan anodik permukaan logam [2, 18].

Selain SRB, IOB, dan metanogen, mikroorganisme lain juga berkontribusi terhadap MIC, termasuk bakteri pereduksi nitrat (NRB, *nitrogen reducing bacteria*) [11] dan bakteri pengoksidasi sulfur (SOB, *sulphate oxidizing bacteria*) [21]. Dalam menghambat atau meningkatkan MIC, NRB bergantung pada kondisi lingkungan. Dalam beberapa kasus, NRB bersaing dengan SRB untuk mendapatkan nutrisi, mengurangi produksi hidrogen sulfida, sementara dalam kasus lain, NRB dapat menghasilkan asam nitrat yang mempercepat korosi. Sementara itu, SOB mengoksidasi senyawa sulfur untuk menghasilkan asam sulfat, yang sangat korosif terhadap logam, terutama di lingkungan lembab atau di lingkungan perairan. Jamur dan alga, meskipun lebih jarang terlibat, juga dapat berkontribusi pada MIC dengan merusak pelapis pelindung atau membentuk *biofilm* yang menjebak agen korosif pada permukaan logam [8, 19, 20]. MIC, sering sekali, disebabkan oleh aktivitas sinergis dari beberapa spesies mikroba yang membentuk *biofilm* bersama-sama. *Biofilm* ini menciptakan lingkungan mikro yang kompleks, yaitu gradien kimia oksigen, pH, dan nutrisi, yang mempercepat korosi setempat, menyebabkan MIC sangat sulit untuk dikendalikan dan diatasi [13, 14].

3.2 Faktor Lingkungan yang Mempengaruhi MIC

Perkembangan MIC sangat dipengaruhi oleh berbagai kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhan dan aktivitas mikroba. Ketersediaan oksigen adalah salah satu faktor yang paling penting, karena akan menentukan jenis mikroorganisme yang dominan di suatu lingkungan dan mekanisme korosi yang digunakan oleh mikroba tersebut [2]. Lingkungan aerob, seperti lapisan atas perairan laut atau pada sistem distribusi air, adalah tempat berkembangbiaknya mikroba seperti IOB [23] dan SOB [24]. Organisme ini mengoksidasi besi atau sulfur, menciptakan oksida atau sulfat yang tidak larut, yang menumpuk di permukaan logam dan menyebabkan korosi aerob diferensial. *Biofilm* aerob sering kali menginduksi *pitting*, yaitu area kecil di permukaan logam menjadi anodik dan menyebabkan terjadinya korosi dengan cepat [14, 21, 22].

Sebaliknya, lingkungan anaerob, yang umumnya ditemukan di sedimen laut dalam, pipa minyak, dan sistem air bawah tanah, mendukung pertumbuhan SRB dan metanogen [25]. Mikroorganisme ini menghasilkan hidrogen sulfida dan metana, yang berkontribusi pada korosi setempat yang agresif. Ketidakhadiran oksigen menyebabkan mikroba anaerob ini menjadi dominan, menciptakan kondisi reduksi yang sangat melemahkan permukaan logam dan mempercepat kerusakannya [9, 11, 24]. Ketersediaan nutrisi adalah faktor kunci lainnya yang mempengaruhi MIC. Karbon organik, nitrogen, dan senyawa sulfur merupakan substrat penting dalam metabolisme mikroba,

menyebabkan pembentukan *biofilm* dan meningkatkan laju korosi. Sebagai contoh; konsentrasi sulfat yang tinggi di air laut mendukung pertumbuhan SRB, sementara di lingkungan yang kaya nitrat, NRB dapat mengurangi atau memperburuk korosi, tergantung pada proses spesifik yang terlibat [7, 25].

pH lingkungan juga memainkan peran signifikan dalam MIC [28]. Lingkungan asam, yang sering diakibatkan oleh aktivitas mikroba, mempercepat korosi dengan meningkatkan kelarutan ion logam dan melemahkan lapisan oksida pelindung. Bakteri penghasil asam (APB, *acid producing bacteria*), misalnya, menghasilkan asam sulfat sebagai produk samping dari oksidasi sulfur, menurunkan pH di sekitar permukaan logam dan menyebabkan degradasi yang cepat [27, 28, 29]. Sebaliknya, kondisi basa cenderung memperlambat aktivitas mikroba, meskipun area setempat dengan pH rendah dalam *biofilm* masih dapat menyebabkan kerusakan signifikan [32].

Suhu mempengaruhi metabolisme mikroba. Suhu yang lebih hangat umumnya menyebabkan pertumbuhan mikroba yang lebih cepat dan MIC yang lebih agresif. Di lingkungan industri, seperti sistem pendingin, suhu yang lebih tinggi dapat menyebabkan pembentukan *biofilm* yang lebih cepat dan meningkatkan laju korosi, sementara lingkungan yang lebih dingin memperlambat aktivitas mikroba tetapi masih dapat mendukung korosi dalam jangka panjang [8].

Salinitas, terutama di lingkungan laut, adalah faktor penting lainnya. Mikroorganisme halofilik (penyuka garam) berkembang biak di kondisi salinitas tinggi, dan adanya ion klorida di air laut semakin mempercepat korosi dengan merusak lapisan oksida pelindung pada permukaan logam [33]. Hal ini menyebabkan lingkungan laut menjadi sangat rentan terhadap MIC, karena faktor biologi dan kimia bekerja bersama untuk mempercepat perusakan logam. Faktor lingkungan ini, oksigen, kadar nutrisi, pH, suhu, dan salinitas, bekerja bersama untuk menciptakan kondisi yang mendukung pertumbuhan mikroba dan korosi, sehingga pemahaman dan pengendalian variabel-variabel ini untuk mengatasi MIC secara efektif adalah sangat penting [34].

3.3 Penyebab Korosi Mikroba

Mekanisme terjadinya korosi oleh mikroba sangat beragam dan sering kali kompleks. Bakteri pereduksi sulfat (SRB/*Sulfate-reducing bacteria*) merupakan salah satu penyumbang utama MIC, terutama di lingkungan yang kekurangan oksigen. SRB memetabolisme ion sulfat, menghasilkan hidrogen sulfida sebagai produk samping metabolisme. Hidrogen sulfida ini bereaksi dengan logam seperti besi dan baja, membentuk lapisan besi sulfida yang menyebabkan korosi setempat [35]. Kehadiran lapisan sulfida ini menciptakan gradien elektrokimia yang menyebabkan pelarutan logam lebih lanjut, terutama dalam bentuk korosi *pitting*/lubang [2, 34]. *Bacillus cereus*, bakteri penyebab korosi yang penting, juga mempercepat degradasi logam dengan cara menghasilkan hidrogen sulfida dan membentuk *biofilm*, yang berkontribusi terhadap MIC di berbagai lingkungan [37].

Bakteri pengoksidasi besi (IOB/*iron-oxidizing bacteria*) bekerja dengan cara berbeda. Bakteri ini tumbuh subur di lingkungan yang beroksigen (aerob) dan mengoksidasi besi ferro menjadi besi ferri, membentuk endapan karat di permukaan logam. Endapan besi ini mengganggu lapisan oksida pelindung alami pada logam, yang menyebabkan logam terbuka terhadap korosi, dan menciptakan lingkungan mikro di bawah *biofilm* sehingga dapat terbentuk korosi lubang/*pitting* [2].

Metanogen, meskipun tidak secara langsung bersifat korosif, berkontribusi pada MIC dengan merusak perlindungan katodik pada struktur logam. Metanogen mengonsumsi hidrogen, yang seharusnya membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam untuk mencegah korosi lebih lanjut [9]. Dengan menghilangkan hidrogen ini, metanogen mempercepat proses korosi, terutama di lingkungan seperti pipa minyak dan gas, yang memanfaatkan perlindungan katodik sebagai pertahanan utama terhadap korosi [38].

Mikroorganisme lain, seperti bakteri penghasil asam (APB), memperburuk korosi dengan menghasilkan produk samping asam seperti asam sulfat. Asam-asam ini menurunkan pH di sekitar permukaan logam, meningkatkan kondisi elektrokimia yang menyebabkan pelarutan logam dan kerusakan logam [8, 9].

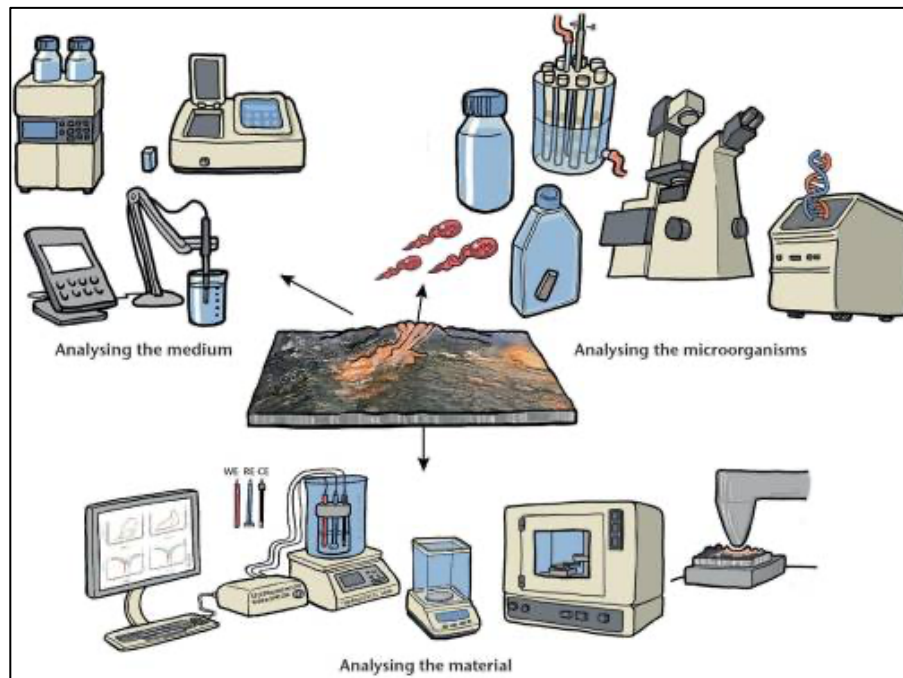
Aktivitas gabungan mikroorganisme ini sering kali membentuk *biofilm*, yaitu media yang digunakan koloni mikroba untuk melindungi dirinya dari lingkungan luar dan menciptakan kondisi setempat yang menyebabkan korosi. *Biofilm* ini menyulitkan penggunaan inhibitor korosi atau biosida secara efektif, karena mikroba terlindungi dalam matriks *biofilm*. Interaksi kompleks antara proses metabolisme mikroba dan lingkungan elektrokimia dalam *biofilm* menjadikan MIC sebagai bentuk korosi yang sangat pelik dan sulit dikendalikan [37, 38].

3.4 Deteksi dan Pemantauan MIC

Kerusakan yang luas sangat penting dicegah dengan deteksi dini karena sifat MIC yang tersembunyi (Gambar 1) [15], [34]. Inspeksi visual, meskipun umum digunakan, sering kali gagal mendeteksi MIC pada tahap awal,

terutama di area yang sulit dijangkau seperti bagian dalam pipa. Metode yang lebih canggih, seperti analisis mikrobiologis, diperlukan untuk mengidentifikasi mikroorganisme spesifik yang terlibat. Teknik berbasis kultur, reaksi rantai polimerase (PCR/*polymerase chain reaction*), dan analisis metagenomik memungkinkan peneliti untuk mengisolasi dan menganalisis spesies mikroba yang ada, yang memberikan informasi berharga mengenai penyebab korosi mikrobiologi [39, 40].

Metode elektrokimia, seperti Spektroskopi Impedansi Elektrokimia (EIS/*electrochemical impedance spectroscopy*), menghasilkan pemantauan *real-time* permukaan logam, memberikan data tentang tingkat korosi dan integritas lapisan oksida pelindung. EIS sangat berguna untuk mendeteksi pembentukan *biofilm*, karena dapat mengidentifikasi perubahan dalam sifat elektrik permukaan logam yang disebabkan oleh aktivitas mikroba [41, 42]. Pengukuran potensio-stat dan galvano-stat juga efektif dalam mengukur korosi, terutama di lingkungan yang diduga sebagai tempat berkembangnya mikroba dalam bentuk *biofilm* [12, 43].



Gambar 1. Pemantauan MIC memerlukan analisis data integratif dengan menggunakan serangkaian alat yang saling melengkapi [15]

Teknik uji non-destruktif (NDT/*non-destructive testing*), seperti uji ultrasonik dan tomografi komputasi sinar-X (CT/*computed tomography*), sangat penting untuk mendeteksi korosi internal tanpa membongkar peralatan. Metode-metode ini dapat mengungkapkan korosi setempat dan *pitting* yang mungkin tidak terlihat di permukaan. Teknologi sensor juga terus berkembang, dengan sensor *biofilm* dan sensor korosi mikroba yang sekarang mampu memberikan data *real-time* secara terus-menerus mengenai aktivitas mikroba dan tingkat korosinya. Sensor-sensor ini dapat diintegrasikan ke dalam sistem industri untuk memantau infrastruktur penting, yang memungkinkan intervensi tepat waktu sebelum korosi menyebabkan kegagalan peralatan atau infrastruktur lainnya [44].

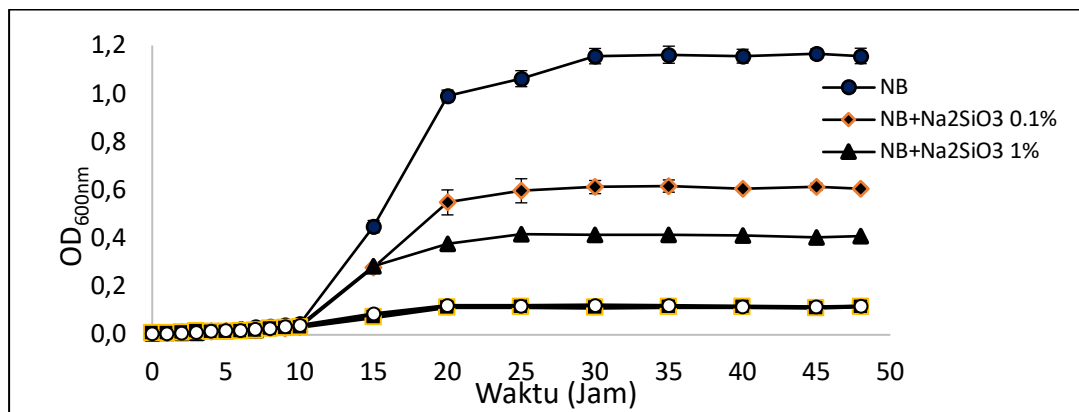
3.5 Strategi Pencegahan dan Mitigasi

Mengelola MIC memerlukan kombinasi strategi yang mengatasi baik aktivitas mikroba maupun kondisi lingkungan yang menyebabkan korosi [34]. Salah satu langkah pencegahan yang paling efektif adalah pemilihan material yang tahan terhadap korosi mikroba. Logam paduan tahan korosi, seperti baja tahan karat, titanium, dan logam paduan berbasis tembaga, memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap serangan mikroba [2, 13, 37]. Selain itu, pelapisan memainkan peran penting dalam pencegahan MIC dengan menciptakan penghalang antara permukaan logam dan lingkungan mikroba. Pelapis antimikroba, yang sering kali mengandung logam seperti perak atau tembaga, menghambat pertumbuhan mikroba, sementara pelapis berbasis epoksi memberikan penghalang fisik yang mencegah kontak mikroba dengan logam [10, 45].

Penggunaan biosida adalah strategi umum lainnya untuk mengendalikan populasi mikroba di lingkungan tempat MIC menjadi masalah. Biosida pengoksidasi, seperti klorin dan hidrogen peroksida, merusak dinding sel mikroba. Biosida non-pengoksidasi, seperti glutaraldehida, menghambat metabolisme mikroba. Namun, biosida harus diterapkan dengan hati-hati, karena penggunaan yang berlebihan dapat menyebabkan perkembangan galur mikroba yang resisten [6, 46, 47]. Selain perlakuan kimiawi, mengontrol pembentukan *biofilm* sangat penting untuk mengurangi MIC. Perlakuan berbasis enzim dapat merusak matriks *biofilm*, sementara modifikasi permukaan, seperti pelapis hidrofobik, mengurangi adhesi mikroba dan mencegah pembentukan *biofilm* [48].

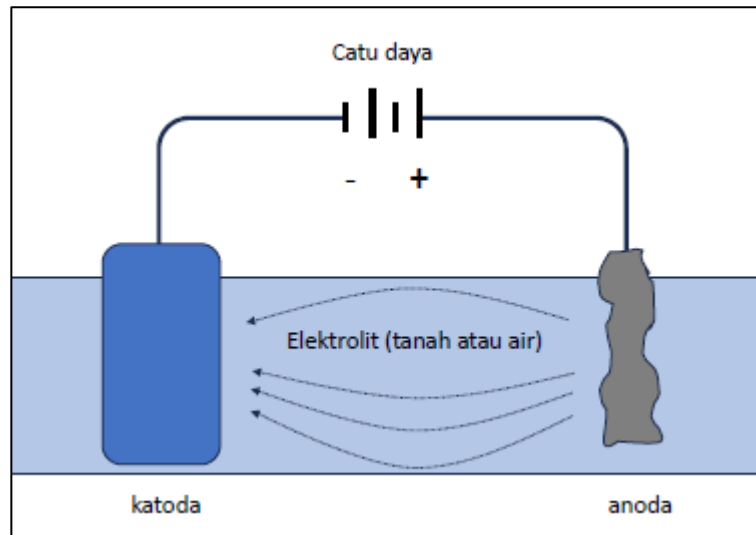
Tanin merupakan salah satu alternatif ramah lingkungan dalam mitigasi MIC. Tanin, yang berasal dari tumbuhan, memiliki sifat antimikroba dan dapat bertindak sebagai inhibitor korosi dengan membentuk lapisan kompleks pada permukaan logam, yang melindungi logam dari serangan mikroba. Tanin bekerja dengan menekan pertumbuhan mikroorganisme seperti bakteri pereduksi sulfat (SRB) dan bakteri pengoksidasi besi (IOB), yang merupakan penyebab utama MIC. Senyawa alami ini menawarkan alternatif yang lebih aman dibandingkan biosida kimia beracun, karena sifatnya yang *biodegradable* dan ramah lingkungan. Penggunaan tanin semakin banyak diteliti, terutama dalam konteks lingkungan korosif seperti sistem kelautan [32, 49, 50].

Inhibitor lain yang digunakan untuk mencegah MIC adalah natrium dikromat dan natrium silikat, yang telah terbukti efektif dalam mencegah pertumbuhan mikroba pada permukaan logam. Penelitian menunjukkan bahwa senyawa ini dapat menghambat pertumbuhan *Bacillus cereus*, bakteri penyebab korosi, dengan membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam [37]. Lapisan ini mengurangi kontak mikroba dengan logam, sehingga mengurangi korosi. Natrium dikromat dan natrium silikat telah banyak digunakan dalam aplikasi industri untuk mengendalikan MIC, dengan natrium silikat membentuk lapisan kaya silikon yang mencegah korosi yang disebabkan oleh mikroba (Gambar 2) [37].



Gambar 2. Penghambatan pertumbuhan *Bacillus cereus*, bakteri penyebab korosi, oleh beberapa konsentrasi Na₂SiO₃ dalam media kaldu nutrisi (NB, *nutrient broth*) Standard deviasi dihitung dari rata-rata 5 percobaan [37]

Perlindungan katodik (Gambar 3), teknik yang banyak digunakan untuk pencegahan korosi umum, juga efektif melawan MIC. Sistem perlindungan katodik arus terinduksi (ICCP/*impressed current cathodic protection*) mengurangi aktivitas elektrokimia permukaan logam, membuatnya lebih tahan terhadap korosi mikroba [51, 52]. Anoda korban, yang terkorosi menggantikan logam yang dilindungi, merupakan metode lain yang umum digunakan dalam pipa dan infrastruktur di laut [53].



Gambar 3. Perlindungan katodik melindungi logam (katoda) dengan menggunakan anoda korban

Teknologi baru, seperti pelapis pintar (*self-healing*) dan nanomaterial, menawarkan pendekatan baru untuk mitigasi MIC. Pelapis *self-healing* mengandung kapsul mikro yang melepaskan inhibitor korosi jika pelapis rusak, sehingga menghasilkan perlindungan jangka panjang [54, 55]. Teknologi-nano, terutama penggunaan partikel nano, meningkatkan sifat antimikroba dari pelapis, menjadikannya lebih efektif dalam mencegah pembentukan *biofilm* dan terjadinya korosi oleh mikroba [10]. Dengan mengintegrasikan teknik-teknik canggih ini bersama strategi tradisional, industri dapat meningkatkan pertahanan mereka terhadap MIC dan memastikan keberlanjutan infrastruktur dalam jangka panjang.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Korosi yang disebabkan oleh mikroba (MIC) tetap menjadi tantangan utama bagi industri yang bergantung pada infrastruktur logam. Mikroorganisme yang terlibat, seperti bakteri pereduksi sulfat, bakteri pengoksidasi besi, dan metanogen, berkontribusi pada degradasi material melalui proses biokimia yang kompleks yang mempercepat korosi. Pengembangan strategi pencegahan dan mitigasi yang efektif sangat penting dilakukan dengan memahami faktor lingkungan yang mendukung MIC, termasuk ketersediaan oksigen, tingkat nutrisi, dan pH. Pendekatan tradisional berperan penting dalam pengelolaan MIC, seperti penggunaan biosida, perlindungan katodik, dan penggunaan material tahan korosi. Namun, teknologi baru, seperti pelapis pintar, nanoteknologi, dan sistem pemantauan *real-time*, merupakan solusi baru yang menjanjikan untuk mengendalikan MIC secara lebih efisien dan berkelanjutan. Penelitian lanjutan mengenai teknologi-teknologi ini sangat penting untuk mengembangkan strategi jangka panjang untuk melawan MIC dan melindungi infrastruktur penting dari korosi oleh mikroba.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Jin, J. Wang, L. Tian, M. Gao, J. Zhao, and L. Ren, "Recent advances in emerging integrated antifouling and anticorrosion coatings," *Mater. Des.*, vol. 213, p. 110307, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110307.
- [2] B. J. Little *et al.*, "Microbially influenced corrosion—Any progress?," *Corros. Sci.*, vol. 170, p. 108641, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.corsci.2020.108641.
- [3] B. J. Little and J. S. Lee, "Microbiologically Influenced Corrosion," in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 1st ed., Kirk-Othmer, Ed., Wiley, 2009, pp. 1–42. doi: 10.1002/0471238961.micrlitt.a01.
- [4] S. Kokilaramani, M. M. Al-Ansari, A. Rajasekar, F. S. Al-Khattaf, A. Hussain, and M. Govarthanan, "Microbial influenced corrosion of processing industry by re-circulating waste water and its control measures - A review," *Chemosphere*, vol. 265, p. 129075, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129075.
- [5] P. Kumari and M. Lavanya, "Optimization Strategies for Corrosion Management in Industries with Artificial Neural Network and Response Surface Technology: A Comprehensive Review," *J. Bio- Tribo-Corros.*, vol. 10, no. 3, p. 59, Sep. 2024, doi: 10.1007/s40735-024-00863-z.
- [6] S. Fernandes, I. B. Gomes, M. Simões, and L. C. Simões, "Novel chemical-based approaches for biofilm cleaning and disinfection," *Curr. Opin. Food Sci.*, vol. 55, p. 101124, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.cofs.2024.101124.

- [7] B. B. Kjellerup *et al.*, "Biocorrosion and biofilm formation in a nutrient limited heating system subjected to alternating microaerophilic conditions," *Biofouling*, vol. 25, no. 8, pp. 727–737, Nov. 2009, doi: 10.1080/08927010903114611.
- [8] J. Li, L. Chen, B. Wei, J. Xu, B. Wei, and C. Sun, "Microbiologically influenced corrosion of circulating cooling systems in power plants – A review," *Arab. J. Chem.*, vol. 17, no. 2, p. 105529, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.105529.
- [9] P. Liu, H. Zhang, Y. Fan, and D. Xu, "Microbially Influenced Corrosion of Steel in Marine Environments: A Review from Mechanisms to Prevention," *Microorganisms*, vol. 11, no. 9, p. 2299, Sep. 2023, doi: 10.3390/microorganisms11092299.
- [10] S. T. Kalajahi, A. Misra, and A. Koerdt, "Nanotechnology to mitigate microbiologically influenced corrosion (MIC)," *Front. Nanotechnol.*, vol. 6, p. 1340352, Apr. 2024, doi: 10.3389/fnano.2024.1340352.
- [11] F. Fan, B. Zhang, P. L. Morrill, and T. Husain, "Isolation of nitrate-reducing bacteria from an offshore reservoir and the associated biosurfactant production," *RSC Adv.*, vol. 8, no. 47, pp. 26596–26609, 2018, doi: 10.1039/C8RA03377C.
- [12] D. A. Leal, I. C. Riegel-Vidotti, M. G. S. Ferreira, and C. E. B. Marino, "Smart coating based on double stimuli-responsive microcapsules containing linseed oil and benzotriazole for active corrosion protection," *Corros. Sci.*, vol. 130, pp. 56–63, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.corsci.2017.10.009.
- [13] S. Sanyal *et al.*, "Emerging Trends in Smart Self-Healing Coatings: A Focus on Micro/Nanocontainer Technologies for Enhanced Corrosion Protection," *Coatings*, vol. 14, no. 3, p. 324, Mar. 2024, doi: 10.3390/coatings14030324.
- [14] Y. Li *et al.*, "Anaerobic microbiologically influenced corrosion mechanisms interpreted using bioenergetics and bioelectrochemistry: A review," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 10, pp. 1713–1718, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jmst.2018.02.023.
- [15] J. Knisz *et al.*, "Microbiologically influenced corrosion—more than just microorganisms," *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 47, no. 5, p. fuad041, Sep. 2023, doi: 10.1093/femsre/fuad041.
- [16] M. K. Pal and M. Lavanya, "Microbial Influenced Corrosion: Understanding Bioadhesion and Biofilm Formation," *J. Bio- Tribo-Corros.*, vol. 8, no. 3, p. 76, Sep. 2022, doi: 10.1007/s40735-022-00677-x.
- [17] H. Makita, "Iron-oxidizing bacteria in marine environments: recent progresses and future directions," *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 34, no. 8, p. 110, Aug. 2018, doi: 10.1007/s11274-018-2491-y.
- [18] I. R. Baker, S. L. Matzen, C. J. Schuler, B. M. Toner, and P. R. Girguis, "Aerobic iron-oxidizing bacteria secrete metabolites that markedly impede abiotic iron oxidation," *PNAS Nexus*, vol. 2, no. 12, p. pgad421, Dec. 2023, doi: 10.1093/pnasnexus/pgad421.
- [19] L. Lin, C.-H. Tsou, B. Dou, S. Yan, Y. Zeng, and M. Gong, "Electrochemical corrosion behavior and mechanism of iron-oxidizing bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* from acid mine drainage on Q235 carbon steel," *New J. Chem.*, vol. 46, no. 42, pp. 20279–20291, 2022, doi: 10.1039/D2NJ04013A.
- [20] S. Hirano *et al.*, "Novel Methanobacterium Strain Induces Severe Corrosion by Retrieving Electrons from Fe0 under a Freshwater Environment," *Microorganisms*, vol. 10, no. 2, p. 270, Jan. 2022, doi: 10.3390/microorganisms10020270.
- [21] H. Tian, P. Gao, C. Qi, G. Li, and T. Ma, "Nitrate and oxygen significantly changed the abundance rather than structure of sulphate-reducing and sulphur-oxidising bacteria in water retrieved from petroleum reservoirs," *Environ. Microbiol. Rep.*, vol. 16, no. 2, p. e13248, Apr. 2024, doi: 10.1111/1758-2229.13248.
- [22] O. Olufemi Odeyemi and P. Adeniyi Alaba, "Microbiologically Influenced Corrosion in Oil Fields: Mechanisms, Detection, and Mitigation Strategies," in *Corrosion Engineering - Recent Breakthroughs and Innovative Solutions*, J. Ou, Ed., IntechOpen, 2024. doi: 10.5772/intechopen.1005181.
- [23] W. S. Lee, H. A. Aziz, and H. A. Tajarudin, "A recent development on iron-oxidising bacteria (IOB) applications in water and wastewater treatment," *J. Water Process Eng.*, vol. 49, p. 103109, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jwpe.2022.103109.
- [24] D. J. Young, "Corrosion by Sulphur," in *High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals*, Elsevier, 2016, pp. 393–430. doi: 10.1016/B978-0-08-100101-1.00008-X.
- [25] M. Perner *et al.*, "Environmental changes affect the microbial release of hydrogen sulfide and methane from sediments at Boknis Eck (SW Baltic Sea)," *Front. Microbiol.*, vol. 13, p. 1096062, Dec. 2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.1096062.
- [26] H. Castaneda and X. D. Benetton, "SRB-biofilm influence in active corrosion sites formed at the steel-electrolyte interface when exposed to artificial seawater conditions," *Corros. Sci.*, vol. 50, no. 4, pp. 1169–1183, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.corsci.2007.11.032.
- [27] S. Bagheri Novair, Z. Biglari Quchan Atigh, B. Asgari Lajayer, W. Shu, and G. W. Price, "The role of sulphate-reducing bacteria (SRB) in bioremediation of sulphate-rich wastewater: Focus on the source of electron donors," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 184, pp. 190–207, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.psep.2024.01.103.

- [28] L. B. Schultze, A. Maldonado, A. Lussi, A. Sculean, and S. Eick, "The Impact of the pH Value on Biofilm Formation," in *Monographs in Oral Science*, vol. 29, S. Eick, Ed., S. Karger AG, 2021, pp. 19–29. doi: 10.1159/000510196.
- [29] M. A. Diaz-Mateus, L. L. Machuca, H. Farhat, and S. J. Salgar-Chaparro, "Synergistic corrosion effects of magnetite and microorganisms: microbial community dependency," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 108, no. 1, p. 253, Dec. 2024, doi: 10.1007/s00253-024-13086-6.
- [30] Y. Dong, B. Jiang, D. Xu, C. Jiang, Q. Li, and T. Gu, "Severe microbiologically influenced corrosion of S32654 super austenitic stainless steel by acid producing bacterium *Acidithiobacillus caldus* SM-1," *Bioelectrochemistry*, vol. 123, pp. 34–44, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.bioelechem.2018.04.014.
- [31] A. Ibrahim, K. Hawboldt, C. Bottaro, and F. Khan, "Review and analysis of microbiologically influenced corrosion: the chemical environment in oil and gas facilities," *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 8, pp. 549–563, Nov. 2018, doi: 10.1080/1478422X.2018.1511326.
- [32] A. Zhao, J. Sun, and Y. Liu, "Understanding bacterial biofilms: From definition to treatment strategies," *Front. Cell. Infect. Microbiol.*, vol. 13, p. 1137947, Apr. 2023, doi: 10.3389/fcimb.2023.1137947.
- [33] M. L. Carvalho, J. Doma, M. Sztylek, I. Beech, and P. Cristiani, "The study of marine corrosion of copper alloys in chlorinated condenser cooling circuits: The role of microbiological components," *Bioelectrochemistry*, vol. 97, pp. 2–6, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.bioelechem.2013.12.005.
- [34] M. A. Ahmed, S. A. Mahmoud, and A. A. Mohamed, "Unveiling the complexities of microbiologically induced corrosion: mechanisms, detection techniques, and mitigation strategies," *Front. Environ. Sci. Eng.*, vol. 18, no. 10, p. 120, Oct. 2024, doi: 10.1007/s11783-024-1880-8.
- [35] A. K. Tripathi *et al.*, "Gene Sets and Mechanisms of Sulfate-Reducing Bacteria Biofilm Formation and Quorum Sensing With Impact on Corrosion," *Front. Microbiol.*, vol. 12, p. 754140, Oct. 2021, doi: 10.3389/fmicb.2021.754140.
- [36] M. A. Javed, W. C. Neil, G. McAdam, and S. A. Wade, "Effect of sulphate-reducing bacteria on the microbiologically influenced corrosion of ten different metals using constant test conditions," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 125, pp. 73–85, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.ibiod.2017.08.011.
- [37] Y. Ciawi, F. S. Inabuy, N. M. Teriyani, and Y. Ramona, "Potential of sodium dichromate and sodium silicate to control in vitro growth of *Bacillus cereus*, a metal corrosion-causing bacterium," *Biodiversitas J. Biol. Divers.*, vol. 24, no. 3, Mar. 2023, doi: 10.13057/biodiv/d240324.
- [38] P. A. Palacios, W. R. Francis, and A.-E. Rotaru, "A Win-Loss Interaction on Fe0 Between Methanogens and Acetogens From a Climate Lake," *Front. Microbiol.*, vol. 12, p. 638282, May 2021, doi: 10.3389/fmicb.2021.638282.
- [39] T. S. Rao, "Industrial applications and implications of biofilms," in *Understanding Microbial Biofilms*, Elsevier, 2023, pp. 713–738. doi: 10.1016/B978-0-323-99977-9.00029-6.
- [40] S. N. Victoria, A. Sharma, and R. Manivannan, "Metal corrosion induced by microbial activity – Mechanism and control options," *J. Indian Chem. Soc.*, vol. 98, no. 6, p. 100083, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jics.2021.100083.
- [41] M. Moradi, G. Ghiara, R. Spotorno, D. Xu, and P. Cristiani, "Understanding biofilm impact on electrochemical impedance spectroscopy analyses in microbial corrosion and microbial corrosion inhibition phenomena," *Electrochimica Acta*, vol. 426, p. 140803, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.electacta.2022.140803.
- [42] R. Srinivasan and R. Punathil Meethal, "EIS Technique for Corrosion Study and Analysis," in *A Treatise on Corrosion Science, Engineering and Technology*, U. Kamachi Mudali, T. Subba Rao, S. Ningshen, R. G. Pillai, R. P. George, and T. M. Sridhar, Eds., in Indian Institute of Metals Series. , Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 3–20. doi: 10.1007/978-981-16-9302-1_1.
- [43] M. Dargahi, Z. Hosseinidoust, N. Tufenkji, and S. Omanovic, "Investigating electrochemical removal of bacterial biofilms from stainless steel substrates," *Colloids Surf. B Biointerfaces*, vol. 117, pp. 152–157, May 2014, doi: 10.1016/j.colsurfb.2014.02.021.
- [44] V. Vasagar *et al.*, "Non-destructive techniques for corrosion detection: A review," *Corros. Eng. Sci. Technol. Int. J. Corros. Process. Corros. Control*, vol. 59, no. 1, pp. 56–85, Feb. 2024, doi: 10.1177/1478422X241229621.
- [45] J. Sahoo, S. Sarkhel, N. Mukherjee, and A. Jaiswal, "Nanomaterial-Based Antimicrobial Coating for Biomedical Implants: New Age Solution for Biofilm-Associated Infections," *ACS Omega*, vol. 7, no. 50, pp. 45962–45980, Dec. 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c06211.
- [46] P. Bajpai, "The Control of Microbiological Problems**Some excerpts taken from Bajpai P (2012). *Biotechnology for Pulp and Paper Processing* with kind permission from Springer Science1Business Media," in *Pulp and Paper Industry*, Elsevier, 2015, pp. 103–195. doi: 10.1016/B978-0-12-803409-5.00008-2.
- [47] X. Shi *et al.*, "Comprehensive Review on the Use of Biocides in Microbiologically Influenced Corrosion," *Microorganisms*, vol. 11, no. 9, p. 2194, Aug. 2023, doi: 10.3390/microorganisms11092194.
- [48] S. Sharma, J. Mohler, S. D. Mahajan, S. A. Schwartz, L. Bruggemann, and R. Aalinkeel, "Microbial Biofilm: A Review on Formation, Infection, Antibiotic Resistance, Control Measures, and Innovative Treatment," *Microorganisms*, vol. 11, no. 6, p. 1614, Jun. 2023, doi: 10.3390/microorganisms11061614.

- [49] A. S. Imbia, A. Ounkaew, X. Mao, H. Zeng, Y. Liu, and R. Narain, "Tannic Acid-Based Coatings Containing Zwitterionic Copolymers for Improved Antifouling and Antibacterial Properties," *Langmuir*, p. acs.langmuir.3c03237, Feb. 2024, doi: 10.1021/acs.langmuir.3c03237.
- [50] C. S. Proença, B. Serrano, J. Correia, and M. E. M. Araújo, "Evaluation of Tannins as Potential Green Corrosion Inhibitors of Aluminium Alloy Used in Aeronautical Industry," *Metals*, vol. 12, no. 3, p. 508, Mar. 2022, doi: 10.3390/met12030508.
- [51] V. Liduino, M. Galvão, S. Brasil, and E. Sérvulo, "SRB-mediated corrosion of marine submerged AISI 1020 steel under impressed current cathodic protection," *Colloids Surf. B Biointerfaces*, vol. 202, p. 111701, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.colsurfb.2021.111701.
- [52] A. A. Thompson, J. L. Wood, E. A. Palombo, W. K. Green, and S. A. Wade, "From laboratory tests to field trials: a review of cathodic protection and microbially influenced corrosion," *Biofouling*, vol. 38, no. 3, pp. 298–320, Mar. 2022, doi: 10.1080/08927014.2022.2058395.
- [53] A. S. H. Makhoul, V. Herrera, and E. Muñoz, "Corrosion and protection of the metallic structures in the petroleum industry due to corrosion and the techniques for protection," in *Handbook of Materials Failure Analysis*, Elsevier, 2018, pp. 107–122. doi: 10.1016/B978-0-08-101928-3.00006-9.