



KOROSI YANG DIPENGARUHI MIKROBIOLOGI DAN TEKNOLOGI PENCEGAHANNYA DI INDUSTRI MINYAK DAN GAS : *REVIEW*

Ahmad Royani^{a,d}, Muhammad Hanafi^b, Heddy Julistiono^c, Azwar Manaf^{d,*}

^a Pusat Riset Metalurgi, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Gedung 470-475, Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Banten, Indonesia 15343

^b Pusat Riset Kimia, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Gedung 452, Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Banten, Indonesia 15343

^c Pusat Riset Biologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Jl. Raya Bogor Km. 46 Cibinong Science Center, Cibinong, Indonesia 16911

^d Program Studi Ilmu Material, Departemen Fisika
Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat, 16424, Indonesia

*E-mail: azwar@ui.ac.id

Masuk tanggal : 27-10-2021, revisi tanggal : 23-02-2022, diterima untuk diterbitkan tanggal 28-02-2022

Abstrak

Korosi yang dipengaruhi oleh mikrobiologi atau MIC (*microbiologically influenced corrosion*) adalah salah satu bentuk korosi lokal yang disebabkan oleh mikroorganisme dan aktivitasnya yang merugikan fasilitas industri minyak dan gas. Keberadaan mikroorganisme dan aktivitasnya yang kompleks memainkan peranan penting dalam pembentukan biofilm dan produk korosi yang menyebabkan kerusakan peralatan. Meskipun beberapa teknik mitigasi dan pencegahan dalam upaya pengendalian mikroorganisme telah dilakukan, tinjauan mitigasi korosi yang dipengaruhi mikroorganisme masih terbatas. Tinjauan ini memberikan beberapa mikroorganisme yang terkait dengan MIC, formasi biofilm, beberapa metode deteksi untuk evaluasi mikroorganisme dan teknologi pengendalian mikroorganisme di industri minyak dan gas. Perkembangan teknologi terkini pengendalian mikroorganisme di industri lainnya juga turut dibahas. Berbagai teknologi deteksi, mitigasi, dan pencegahan diterapkan untuk mengontrol MIC yang kompleks. Namun, pengembangan teknologi untuk pengendalian MIC masih diperlukan. Pengembangan teknologi mitigasi MIC dapat mencakup penggunaan biosida ramah lingkungan untuk menggantikan biosida konvensional, penggunaan bahan antibakteri, pelapisan cat, dan bakteri pesaing untuk pengendalian biokorosi.

Kata Kunci: Biofilm, korosi yang dipengaruhi mikrobiologi, mikroorganisme, minyak dan gas, mitigasi

Abstract

MIC (*microbiologically influenced corrosion*) is a form of local corrosion caused by microorganisms and their activities, which harm facilities of the oil and gas industries. The presence of microorganisms and their complex activities have an important role in the biofilm formations and corrosion products that cause damage to equipment. Although several mitigation and prevention techniques in microbiological control efforts have been carried out, the mitigation review for microbiologically influenced corrosion is still limited. This review provides some of the microorganisms associated with MIC, biofilm formations, some detection methods for evaluation microorganisms, and the technology of controlling microorganisms in the oil and gas industries. The development of trend technology for controlling microorganisms in other industries also is discussed. Various detection, mitigation, and prevention technologies are applied to control complex MICs. However, development technology for controlling MIC is still needed. The development of technologies for mitigation MIC can include using eco-friendly biocide to replace conventional biocides, the use of antibacterial materials, coatings, and the competitor bacterial for biocorrosion control.

Keywords: Biofilm, microbiologically influenced corrosion, microorganism, oil and gas, mitigation

1. PENDAHULUAN

MIC (*microbiologically influenced corrosion*) atau korosi yang dipengaruhi proses mikrobiologis pada logam merupakan masalah utama bagi industri minyak dan gas. Diperkirakan sekitar 20 - 40 % korosi internal pada pipa di industri minyak dan gas terjadi akibat MIC [1]. MIC atau biokorosi sering membentuk lubang (*pitting corrosion*) pada pipa baja karbon yang menyebabkan kegagalan pipa dan tumpahan minyak [2]-[3]. Biofilm yang menempel pada permukaan material pipa merupakan faktor penting yang dapat menginduksi MIC. Biofilm merupakan koloni dari sel mikroorganisme yang menempel pada substrat logam dan tidak bergerak, tumbuh dan berkembang biak serta menghasilkan zat polimer ekstraseluler [4]. Penempelan mikroorganisme adalah proses yang sangat spontan, yang hampir dapat menyebabkan korosi pada semua material logam. Hasil studi pengaruh bakteri terhadap sepuluh logam berbeda menunjukkan adanya percepatan korosi baja karbon dan paduan tembaga-nikel dalam kondisi uji biotik [5]. Biokorosi telah membuat kerugian yang tinggi di industri minyak dan gas serta industri lainnya setiap tahunnya. Sehingga pencegahan dan perlindungan permukaan material dari MIC menjadi masalah penting yang perlu dipecahkan.

Meskipun sifat elektrokimia korosi tetap berlaku untuk proses korosi yang dipengaruhi oleh proses mikrobiologis (MIC), peran mikroorganisme dalam proses korosi tetap menginduksi beberapa parameter korosi, yang paling signifikan adalah modifikasi antarmuka logam dengan larutan oleh pembentukan biofilm [6]. Dalam kondisi anoksik (tanpa oksigen), satu-satunya reaktan yang tersedia untuk mengoksidasi besi adalah proton yang diturunkan dari air. Pada keadaan ini, kinetika reaksi berlangsung sangat lambat, sehingga terjadinya korosi secara teoritis dan teknis dalam kondisi anoksik tanpa adanya oksigen tidak signifikan [7]. Namun, hal lain terjadi jika dalam kondisi anoksik terdapat bakteri atau mikroorganisme yang bersifat anerobik. Pada kondisi ekstrim yang diamati di lingkungan anoksik, menunjukkan bahwa proses biologi memainkan peran penting dalam korosi besi dan baja [7]. Dilaporkan bahwa mikroorganisme sangat mempengaruhi reaksi korosi dalam kondisi anoksik, seperti korosi internal pada pipa terkubur [8] atau pipa bawah laut yang mengandung air dan/atau minyak [9]. Metabolisme mikroba memodifikasi kinetika reaksi korosi dan dapat menghasilkan sejumlah

besar reaktan biokimia. Oleh karena itu, jaringan pipa yang membawa minyak atau gas dalam kondisi anoksik dan fasilitas minyak lepas pantai dapat menyediakan lingkungan kaya nutrisi untuk mikroorganisme. Dengan demikian, pembentukan biofilm merupakan kunci terjadinya perubahan kondisi pada permukaan logam yang dapat menyebabkan peningkatan atau penghambatan korosi [6].

Pembentukan biofilm pada logam merupakan hasil dari proses akumulasi dalam suatu ruang dan waktu yang dimulai segera setelah logam direndam dalam lingkungan berair. Lapisan tipis terbentuk akibat pengendapan ion anorganik dan senyawa organik dengan massa molekul relatif tinggi. Lapisan tipis awal ini dapat mengubah muatan elektrostatik dan keterbasahan permukaan logam dan memfasilitasi kolonisasi lebih lanjut oleh bakteri. Dalam waktu singkat, pertumbuhan mikroba dan produksi EPS (*exopolysaccharides polymeric substrate*) menghasilkan pengembangan biofilm [10]. Kolonisasi mikroba pada permukaan logam secara drastis mengubah sifat permukaan logam dan lingkungan sekitarnya. Perubahan tersebut antara lain terjadi pada nilai pH, potensial oksidasi-reduksi, substrat logam dan produk korosinya, serta variabel elektrokimia yang dapat mempengaruhi laju korosi [11]. Perubahan ini mungkin memiliki efek yang berbeda terhadap induksi korosi lokal, perubahan laju korosi hingga penghambatan korosi [12].

Pengetahuan tentang MIC sebagian besar bergantung pada studi kultur murni, ganda, atau campuran yang diinkubasi dengan kupon baja [13]. Beberapa tinjauan literatur sebelumnya telah berfokus pada mekanisme pembentukan MIC [14], interaksi biofilm dan permukaan baja di lingkungan laut [15], strategi mitigasi [16], prediksi dan mitigasi MIC [17], mekanisme inhibisi MIC [18], perlakuan di industri biofilm [19], kontrol dan manajemen MIC di industri minyak dan gas [1]. Dalam kajian singkat ini, kajian menitikberatkan pada kompleksitas MIC, mekanisme MIC dan teknologi pencegahannya di industri minyak dan gas. Setelah ringkasan singkat tentang kompleksitas MIC di industri minyak dan gas, juga dibahas sedikit trend terbaru teknologi pencegahan korosi akibat mikroorganisme diluar industri minyak dan gas.

2. KOROSI YANG DIPENGARUHI MIKROBIOLOGI (MIC)

Mikroorganisme, termasuk bakteri, jamur, archaea, dan mikroalga, dapat mempengaruhi korosi secara langsung atau tidak langsung,

tergantung pada reaksi spesifik mikroorganisme, material dan elektrolit. Mekanisme yang mendasari secara keseluruhan dinamakan dengan istilah MIC yakni korosi yang dipengaruhi mikroorganisme [20], merupakan hasil interaksi dari mikroorganisme, media (komposisi kimia dan parameter fisik, misalnya suhu dan aliran), dan logam. Selanjutnya, disiplin ilmu yang berbeda ini biasanya ditangani oleh spesialis di satu bidang, sehingga menambah kesulitan dalam mempelajari MIC. Ketiga disiplin ilmu tersebut memiliki aspek yang berbeda yang harus dipahami bersama, serta pandangan yang berbeda tentang masalah MIC. Mendefinisikan kontribusi spesifik MIC terhadap korosi lebih rumit karena MIC dan proses korosi lainnya sering terjadi secara bersamaan. Selanjutnya, semua eksperimen korosi non-steril yang dilakukan di lingkungan berair pada suhu di bawah 100 °C dilakukan dengan adanya mikroorganisme. Dengan demikian, pembentukan biofilm dan pengaruhnya terhadap proses korosi dapat diasumsikan tetapi biasanya diabaikan.

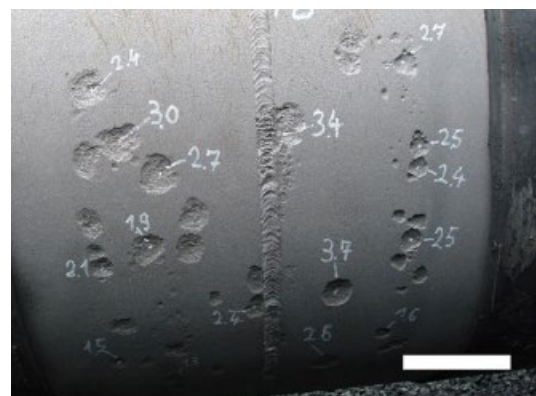
MIC adalah masalah di banyak industri akibat biofilm yang terbentuk pada permukaan logam di lingkungan akutik. Sistem dengan populasi mikroba yang tinggi dan kontrol yang tidak efektif serta kondisi yang mengalami

periode stagnasi atau kondisi aliran dan suhu yang rendah memungkinkan logam rentan akibat mikroorganisme, misalnya pada pembangkit listrik, kilang, fasilitas petrokimia, pabrik baja, pabrik pulp dan kertas, dan infrastruktur maritim [12]. Penelitian kegagalan pada baja karbon AISI 1006 yang disebabkan oleh bakteri pereduksi sulfat (*desulfovibrio piger*) dan bakteri pengoksidasi besi (*acidithiobacillus ferrooxidans*) dengan metode kehilangan berat menunjukkan bahwa kerusakan korosi sumuran akibat MIC lebih merugikan daripada kerusakan akibat korosi seragam [21].

Biokorosi adalah fenomena yang menyebabkan kerusakan material logam atau non logam yang dirangsang oleh mikroorganisme yang berbeda. Gambar 1 dan 2 merupakan kerusakan berupa korosi eksternal akibat adanya MIC pada industri minyak bumi [22] dan gas [23] serta industri petrokimia [24]. MIC dianggap sebagai salah satu tantangan utama dalam industri minyak dan gas sebagai hasil dari proses yang kompleks. MIC menjadi salah satu topik terpenting bagi para insinyur dan ilmuwan di berbagai bidang industri karena masalah ini menyebabkan kerugian ekonomi yang sangat besar pada perusahaan yang seringkali mencapai beberapa miliar dolar AS setiap tahunnya [12].



(a)



(b)



(c)

Gambar 1. (a) Korosi eksternal akibat MIC pada pipa transmisi gas yang terkubur di tanah rawa lokasi kerusakan pada pipa, (b) daerah pengelasan yang terkorosi setelah lapisan aspal dan produk korosi dibersihkan, (c) pembesaran lubang korosi akibat MIC [23]



Gambar 2. Kerusakan akibat SRB pada saluran pipa di ; (a) industri petrokimia [24], (b) industri minyak bumi (kanan) [22]

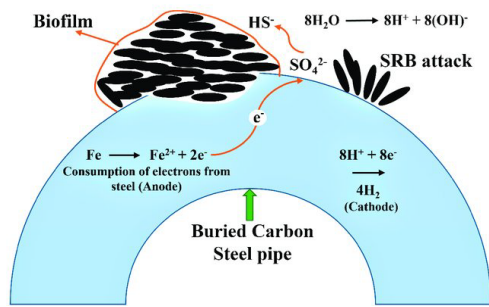
2.1 Mikroorganisme Penyebab MIC

Beberapa jenis mikroorganisme tumbuh dan berkembang dalam sistem injeksi minyak, gas dan air karena terdapat unsur-unsur penting yang dibutuhkan mikroorganisme. Mikroorganisme membutuhkan empat elemen untuk berkembang yaitu sumber karbon, air, donor elektron dan akseptor elektron [20]. Hidrokarbon dan senyawa organik lainnya merupakan sumber makanan yang sangat baik untuk berbagai macam mikroba terutama jenis bakteri, *Archaea* dan *Eucarya* [25]. Dari tiga mikroorganisme yang ada di industri minyak dan gas, bakteri mendapat perhatian paling besar dalam studi MIC [25]. Studi terbaru menunjukkan bahwa bakteri pereduksi sulfat atau SRB (*sulfate reducing bacteria*) adalah kontributor utama MIC dengan menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S) [26]. Namun, studi terbaru mengungkapkan bahwa lebih banyak spesies dengan mekanisme berbeda yang kompleks terlibat dalam proses ini seperti metanogen, bakteri penghasil asam atau APB (*acid producing bacteria*), bakteri pengoksidasi sulfur atau SOB (*sulfure oxidizing bacteria*), bakteri pereduksi besi atau IRB (*iron reducing bacteria*) dan bakteri pengoksidasi mangan atau MOB (*mangane oxidizing bacteria*) [16]. SOB, IRB, dan MOB memiliki kemampuan menggunakan logam dalam respirasi sebagai donor atau akseptor elektron. Secara khusus, bakteri APB berpotensi mempengaruhi logam dengan menghasilkan berbagai jenis asam. Di sisi lain, metanogen dan spesies bakteri lain dalam kemampuannya memanfaatkan berbagai jenis hidrokarbon juga dianggap sebagai faktor penting pembentukan MIC di lapangan minyak bumi [26]. Dalam situasi praktis, interaksi sinergis antara komunitas mikroorganisme, konsorsium, dan permukaan logam ini menghasilkan MIC.

Faktanya, interaksi biologis yang kompleks ini menambah kompleksitas penyelidikan, prediksi, dan mitigasi MIC [17]. Jenis bakteri yang berasosiasi dengan logam dalam sistem perpipaan adalah bakteri pereduksi sulfat (SRB) [22], bakteri pereduksi logam (MRB) [27], bakteri penghasil asam (APB) [28], dan bakteri pengoksidasi logam (MOB) [29].

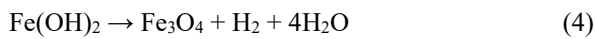
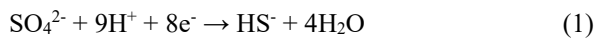
2.1.1 Sulfate Reducing Bacteria

SRB (*sulfate reducing bacteria*) dianggap penting dan utama di banyak ekosistem termasuk sedimen laut, lingkungan ladang minyak, dan hidrotermal laut dalam [30]. SRB mudah ditemukan di fasilitas produksi migas, mulai dari sumur, pipa distribusi, fasilitas pengolahan dan kilang, hingga infrastruktur transportasi dan distribusi [31]. SRB menggunakan ion sulfat (SO_4) sebagai akseptor elektron terminal untuk menghasilkan sulfida (H_2S). Senyawa H_2S inilah sebagai senyawa korosif yang tereduksi ketika kontak dengan logam [32]. Selain itu, SRB juga memiliki kemampuan metabolisme lainnya antara lain dapat mereduksi nitrat dan tiosulfat serta pengambilan elektron langsung dari permukaan logam [33]. SRB dapat memperoleh karbon dan energi dari asam organik dan nutrisi, seperti laktat, asetat dan piruvat [25]. SRB sering dianggap sebagai kontributor utama biokorosi karena kapasitas metabolismenya untuk menghasilkan H_2S [32].



Gambar 3. Skematis peran SRB dalam korosi yang dipengaruhi mikroorganisme [24]

Gambar 3 menunjukkan peran SRB dalam MIC pada pipa terkubur. SRB menggunakan sulfat sebagai akseptor elektron terminal sebagai sumber energi. Reaksi SRB dan produk korosi yang dibentuk sebagai berikut [24]:



Mekanisme korosi oleh SRB juga dapat dijelaskan melalui teori depolarisasi katodik. Teori ini menganggap bahwa hidrogen dari disosiasi air maupun proses korosi dikonsumsi oleh SRB untuk mereduksi sulfat sesuai reaksi-reaksi berikut [14]:

Reaksi disosiasi air:



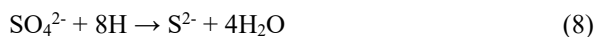
Reaksi di daerah anoda:



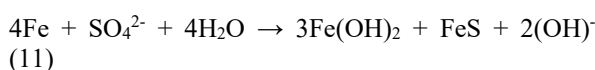
Reaksi di daerah katoda:



Kemudian hidrogen yang dihasilkan baik dari disosiasi air atau proses korosi besi dikonsumsi oleh SRB sesuai reaksi:



Reaksi secara keseluruhan:

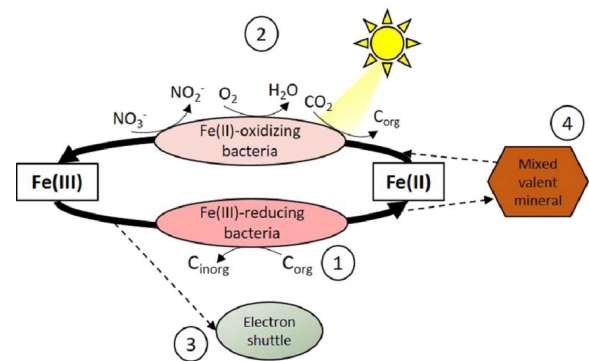


2.1.2 Iron Reducing Bacteria

Strain IRB (*iron reducing bacteria*) mampu mereduksi besi yang tidak larut menjadi besi yang larut [34]. Juga, telah dilaporkan bahwa IRB mampu memetabolisme akseptor elektron

lain yang berbeda termasuk Mn (IV), NO_3^- , NO_2^- , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, SO_3 [35]. IRB sulit dipahami perannya dalam biokorosi karena persyaratan lingkungan yang anaerob dan keragaman metabolisme dari genus IRB yang berbeda. Keterlibatan IRB dalam MIC masih diperdebatkan [36]. *Shewanella* telah dipelajari untuk peran IRB dalam biokorosi. Namun, tidak banyak studi yang telah dilakukan untuk menyelidiki jenis IRB yang dominan dalam komunitas bakteri korosi [35].

Gambar 4 merangkum proses transformasi besi akibat adanya mikroorganisme [37]. Transformasi besi oleh mikroorganisme meliputi (1) reduksi mineral Fe(III) atau Fe(III) kompleks yang terlarut bersamaan dengan oksidasi bahan organik menjadi Fe(II) oleh mikroorganisme, (2) proses oksidasi Fe(II) menjadi Fe(III) oleh mikroorganisme, (3) reduksi Fe(III) oleh molekul pengangkut elektron dan (4) transfer elektron dari reaksi besi [37].



Gambar 4. Proses transformasi besi dipengaruhi oleh mikroorganisme [37]

IRB dikatakan mempercepat korosi dengan tahapan berikut: (1) reduksi senyawa ion besi yang tidak larut menjadi ion besi yang larut sehingga menghilangkan kerak korosi protektif yang terbentuk pada permukaan yang terekspos dan (2) pembentukan sel konsentrasi di antara biofilm [36]. Bakteri pereduksi besi (*Geobacter sp.*) dapat menggunakan ion Fe^{3+} sebagai akseptor elektron dari sumber terlarut maupun dari kristal sehingga dapat menghilangkan senyawa besi protektif pada permukaan logam baja [34].

IRB dapat menghambat proses korosi melalui respirasi aerobiknya dengan menghilangkan oksigen dari sistem. Dilaporkan bahwa laju korosi baja karbon sekitar 4 mpy pada kondisi biotik dengan adanya IRB, jauh lebih rendah dibandingkan dalam kondisi abiotik yaitu sebesar 20 mpy [29]. Selain itu, keberadaan IRB bersama dengan SRB dalam biofilm dapat bermanfaat karena dapat menghancurkan sarang ekologis pereduksi sulfat di dalam biofilm yang terbentuk pada permukaan logam [27].

2.1.3 Acid Producing Bacteria

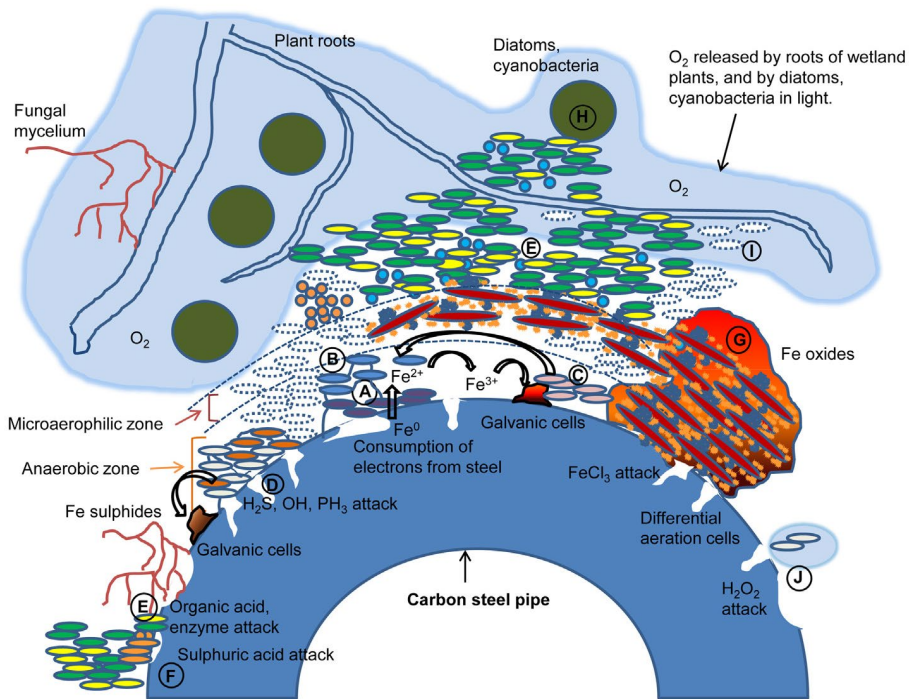
Seperti namanya, strain APB (*acid producing bacteria*) mampu memetabolisme senyawa organik (misalnya, etanol, laktat, hidrokarbon aromatik dan bahkan CO₂) dan menghasilkan asam organik dan anorganik seperti asam asetat. Selain itu, APB juga dapat mempercepat pembentukan lubang sumuran pada logam baja. Telah dilaporkan bahwa terbentuknya biofilm oleh strain *Citrobacter farmeri* pada permukaan baja karbon mempengaruhi proses reaksi anoda dan katoda baja dalam air laut dan mempercepat korosi sumuran [28]. *Clostridium acetitum* menghasilkan asam organik yang telah dilaporkan menyebabkan korosi [14]. Jenis lain seperti *Citrobacter sp.* dapat menghasilkan asam sulfat yang sangat cepat dan korosif serta mampu memberdalam lubang korosi sumuran pada pipa API X70 [38]. Secara umum, asam organik biogenik yang dihasilkan dapat meningkatkan korosi dengan memberikan tambahan reaktan katodik, mengikat ion logam, menghancurkan lapisan film pasif permukaan logam dan menghambat proses pasivasi sehingga mempercepat keterlarutan logam [14].

2.1.4 Metal oxidizing Bacteria

MOB (*metal oxidizing bacteria*) adalah golongan jenis bakteri lain yang sering dilaporkan menyebabkan MIC pada pipa minyak dan gas dan industri lainnya [39]. Peran MOB di MIC telah banyak dilaporkan [29]. Studi elektrokimia mengungkapkan peningkatan nilai OCP (*open circuit potential*), kemiringan kurva Tafel anodik dan laju korosi dengan adanya bakteri *Pseudoxanthomonas sp.* [40] Selain itu, hasil EIS (*electrochemical impedance spectroscopy*) menunjukkan perilaku elektrokimia yang berbeda pada permukaan logam akibat pembentukan biofilm oleh *Pseudoxanthomonas sp.* membuat biofilm pada permukaan logam mengubah bentuk diagram EIS dan menunjukkan perilaku elektrokimia yang berbeda [40], sehingga mempengaruhi laju korosi. MOB adalah mikroaerofilik yang membutuhkan oksigen minimal untuk bertahan hidup. Studi

mengungkapkan bahwa *Bacillus cereus* mampu mendegradasi proton alifatik (jenis atom C dalam spektroskopi yang mempunyai rentang pergeseran kimia 1-83 ppm) dan proton aromatik (jenis atom C dalam spektroskopi yang mempunyai rentang pergeseran kimia 90-165 ppm) dalam diesel dan mampu mengoksidasi besi/mangan menjadi oksida yang mengakibatkan korosi pada baja API 5LX [41].

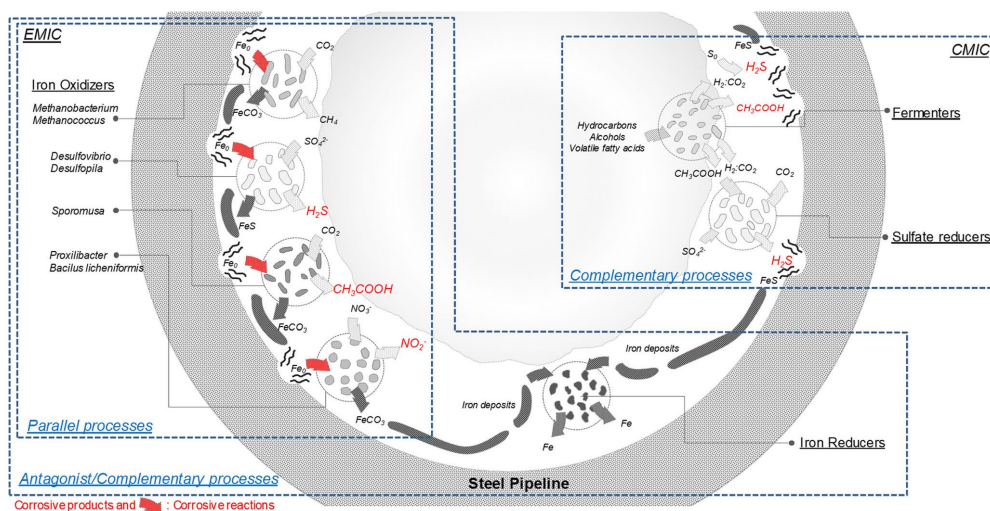
Berbagai jenis mikroorganisme dan metabolismenya mempengaruhi logam dengan banyak cara. Usher dkk., [42] dalam tinjauannya mengilustrasikan secara sederhana beberapa mekanisme mikroorganisme mempengaruhi kerusakan pipa baja yang terkubur. Gambar 5 merupakan mekanisme secara singkat kerusakan pipa baja akibat mikroorganisme (A) metanogen anaerobik dan mikroorganisme pereduksi sulfat yang mengambil elektron secara langsung dari baja menghasilkan Fe²⁺, (B) mikroorganisme anaerob pengoksidasi besi yang memanfaatkan nitrat sebagai akseptor elektron mengoksidasi Fe²⁺ menjadi Fe³⁺ yang mengendap sebagai besi oksida, (C) mikroorganisme anaerobik heterotrofik mereduksi besi oksida (Fe³⁺) yang tidak larut menjadi Fe²⁺, (D) mikroorganisme anaerobik pereduksi sulfat sebagai akseptor elektron yang menghasilkan endapan OH, PH₃, H₂S dan FeS yang dapat mempercepat laju korosi, (E) mikroorganisme anaerobik heterotrofik penghasil asam dan enzim yang menyerang baja, mengkonsumsi oksigen dan membuat gradien oksigen dalam biofilm dengan daerah anoksik bagian bawah, (F) mikroorganisme pengoksidasi sulfur penghasil asam sulfat, (G) mikroorganisme pengoksidasi besi neutrofilik membuat sel aerasi diferensial dan sel galvanik bersama endapan besi oksida, (H) Diatom dan *Cyanobacteria* penghasil oksigen di permukaan tanah, membuat sel aerasi diferensial dan membentuk H₂O₂, (I) mikroorganisme lainnya, dan (J) hidrogen peroksida (H₂O₂) yang dihasilkan mikroorganisme menyerang baja [42]. Secara umum, mekanisme serangan mikroorganisme dapat diringkas sebagai serangan asam, merubah daerah anodik, pembentukan diferensial aerasi atau sel konsentrasi dan depolarisasi katodik serta konsumsi elektron.



Gambar 5. Ilustrasi mekanisme kerusakan akibat berbagai mikroorganisme pada pipa baja yang terkubur [42]

Berbagai jenis mikroorganisme beserta kompleksitasnya juga turut mempengaruhi kerusakan internal pipa di industri minyak dan gas. Gambar 6 adalah model kerusakan pipa akibat biokorosi multispesies mikroorganisme beserta metabolitnya [12]. Terdapat dua mekanisme yang terlibat dalam MIC, yaitu logam dapat diserang secara tidak langsung oleh mikroorganisme melalui produksi metabolit korosif dan logam dapat langsung diserang oleh mikroorganisme tertentu melalui pengambilan elektron secara langsung. Dalam kasus pertama disebut CMIC (*chemical microbiologically*

influence corrosion) atau korosi tipe II seperti besi bereaksi dengan senyawa korosif hidrogen sulfida dari hasil metabolit SRB. Sedangkan mekanisme yang kedua disebut sebagai EMIC (*electrical microbiologically influence corrosion*) atau MIC tipe I. Metabolisme bakteri secara langsung dipicu oleh elektron dari oksidasi besi atau baja melalui transfer elektron langsung dari Fe atau deposit besi sulfida elektrokonduktif ke mikroorganisme [12].



Gambar 6. Komunitas mikroba dan proses yang terlibat dalam biokorosi yang mempengaruhi infrastruktur pipa baja [12]

2.2 Pembentukan Biofilm

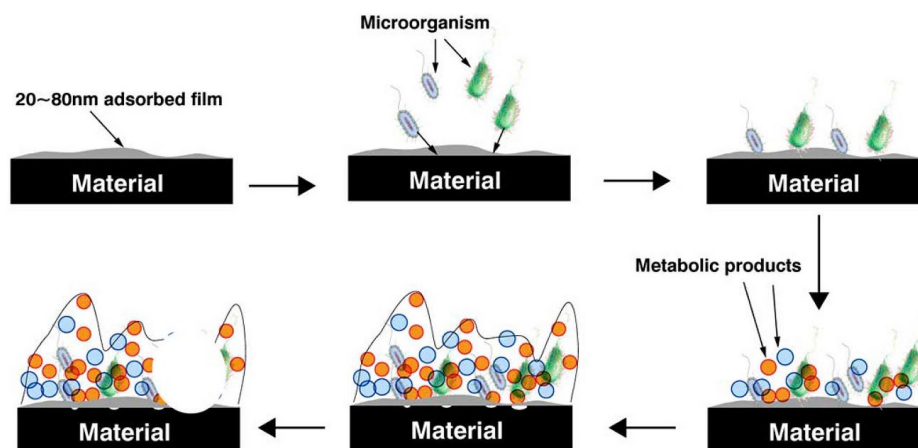
Biofilm mempunyai peran sangat penting dan merupakan awal terjadinya korosi akibat mikroorganismenya. Pembentukan biofilm dimulai sel-sel yang tidak bergerak menempel pada substrat, tumbuh dan berkembang biak dan menghasilkan zat polimer ekstraseluler atau EPS (*extracellular polymeric substance*) yang membentuk biofilm yang kompleks [4]. Pembentukan biofilm dimulai dengan penyerapan makromolekul seperti protein, lipid, polisakarida dan asam humat yang bekerja sebagai kondisioner permukaan material. Makromolekul ini mengubah kimia fisik antarmuka, termasuk hidrofobisitas dan muatan listriknya. Selama tahap ini, karakteristik mikroorganismenya, permukaan, dan media berair memainkan peran penting dalam tingkat transfer bakteri, adhesi dan ukuran biofilm yang dihasilkan. Karakteristik mikroba meliputi muatan permukaan, ukuran sel dan hidrofobisitas. Sifat permukaan meliputi komposisi kimia, kekasaran, inklusi, celah dan oksida. Sifat media berair meliputi jenis aliran sistem dan kekuatan ionik [43].

Selanjutnya pergerakan mikroorganismenya dari daerah *bulk* ke permukaan material. Proses transportasi bakteri dipengaruhi oleh mekanisme kimia [43]. Perlekatan bakteri awal pada logam terbentuk melalui proses adsorpsi reversibel, yang diatur oleh gaya tarik elektrostatik, gaya fisik dan interaksi hidrofobik [44]. Keterikatan awal ini merupakan langkah penting dalam proses pengembangan biofilm. Menempel atau tidaknya sel pengangkut ke permukaan substrat tergantung pada sifat permukaan substrat,

hidrodinamika dan keadaan fisiologis mikroba. Gaya adhesi dipengaruhi oleh sifat fisikokimia substrat dan sifat permukaan sel mikroba. Bakteri yang menempel disebut bakteri sessile dan mempunyai peran penting dalam proses MIC daripada bakteri planktonik [43]. Ketika sel-sel sessile berada di permukaan baja, produk metabolisme sel menginisiasi beberapa reaksi katodik yang mendorong korosi.

Mikroorganismenya yang menempel menghasilkan zat organik perekat lendir yang dikenal sebagai EPS yang memiliki komposisi heterogen meliputi ekso-polisakarida, asam nukleat, protein, glikoprotein, dan fosfolipida [4]. Telah dilaporkan bahwa ekso-polisakarida merupakan komposisi utama yakni sekitar 40-95% dari makromolekul dalam EPS [43]. EPS mendorong proses kolonisasi di permukaan karena memungkinkan bakteri bermuatan negatif seperti SRB untuk menempel pada permukaan logam yang bermuatan positif. Pertumbuhan lebih lanjut dari biofilm tergantung pada laju kolonisasi mikroorganismenya. Pergerakan mikroba ke antarmuka dimediasi oleh (1) difusi gerakan Brown, (2) konveksi aliran sistem dan (3) gerakan motil [44].

Pengembangan biofilm di permukaan adalah proses autokatalitik karena migrasi mikroorganismenya awal meningkatkan ketidakteraturan permukaan dan mendorong pembentukan biofilm padat. Secara singkat, tahapan pembentukan dan perkembangan biofilm yang dipengaruhi oleh mikroorganismenya diilustrasikan dalam Gambar 7 [45].



Gambar 7. Tahapan singkat pembentukan dan perkembangan biofilm [45]

Secara umum, proses pembentukan biofilm terdiri dari 6 tahap yaitu (1) proses adsorpsi ke permukaan material dan pembentukan film, (2) proses migrasi mikroorganismenya (planktonik) ke permukaan material karena tertarik oleh film, (3) penempelan mikroorganismenya pada permukaan

material dan terjadi perubahan dari planktonik menjadi sessile, (4) pertumbuhan mikroorganismenya sessile dan menghasilkan metabolit serta pembentukan biofilm, (5) stabilisasi biofilm dan terbentuknya korosi, (6) stabilitas menurun

seiring lamanya waktu, Sebagian biofilm jatuh dan membuat biofilm heterogen [45].

Banyak penelitian telah menemukan bahwa biofilm heterogen menyebabkan korosi lokal (*pitting corrosion*) karena terjadi sel konsentrasi oksigen [16]. Ketika biofilm heterogen terjadi pada permukaan material, oksigen tidak dapat menyebar keluar dari daerah dengan biofilm padat dan bakteri aerobik di dalam biofilm juga mengkonsumsi oksigen di bawah biofilm. Sehingga oksigen pada daerah ini mengalami penurunan dan akibatnya menjadi daerah anodik dan menyebabkan korosi. Di sisi lain, pada saat bersamaan oksigen pada daerah dengan biofilm kurang padat atau tidak ada biofilm akan lebih tinggi sehingga terjadi perbedaan konsentrasi oksigen dan menjadi daerah katodik [1].

2.3 Metode Investigasi dan Deteksi MIC

Investigasi dan deteksi kerusakan akibat MIC memerlukan kombinasi analisis mikrobiologi, metalurgi, dan kimia. Secara umum, investigasi meliputi (i) identifikasi mikroorganisme penyebab MIC baik dalam media bulk atau terkait dengan produk korosi, (ii) menghubungkan morfologi *pitting* dengan mekanisme MIC, dan (iii) mengidentifikasi komposisi kimia produk korosi yang konsisten dengan organisme penyebab MIC. B.J. Little dkk., [17] dalam kajiannya, mengklasifikasikan metode diagnosa MIC di lapangan ke dalam metode kultur, metode mineralogi dan metode kimia.

Secara historis, identifikasi dan penghitungan mikroba yang berpotensi bermasalah dalam sistem minyak dan gas telah terbukti menjadi tantangan bagi industri [17]. Umumnya keberadaan mikroorganisme atau SRB dinyatakan sebagai indikator kasar untuk MIC. Namun, identifikasi mikroorganisme dari satu lokasi korosi sulit digunakan untuk menentukan hubungan sebab dan akibat. Teknik berbasis kultur hanya mencerminkan hingga 15% dari mikroorganisme yang ada di saluran pipa dan kompleksitas berbagai mikroba sangat diabaikan [17]. Standar industri NACE TM01944 dan ASTM D44125 adalah standard praktik yang umum digunakan untuk monitoring mikroba di lapangan berbasis kultur konvensional. Metode lain untuk diagnosis MIC di lapangan adalah NACE TM0194-2014 (*field monitoring of bacterial growth in oil and gas systems*) [46] dan NACE TM0212-2018 (*detection, testing, and evaluation of microbiologically influenced corrosion on internal surfaces of pipelines*) [47].

Keterbatasan metode berbasis kultur ini telah mengilhami penerapan metode mikrobiologi

molekuler dengan menargetkan RNA, DNA dan protein [48]. Metode mikrobiologi molekuler untuk pemantauan mikroba termasuk FISH (*fluorescence in situ hybridization*), metode mikroskopis berdasarkan pewarnaan asam nukleat DNA oleh agen seperti 4',6-diamidino-2-phenylindole (DAPI) atau SYBR Green. qPCR (*quantitative polymerase chain reaction*) untuk memantau gen tertentu yang diminati. Amplifikasi dan sekuensing gen 16S rRNA untuk mengidentifikasi jenis mikrobiota yang ada dalam sampel lingkungan [49].

Evaluasi morfologi lubang (*pitting corrosion*) adalah cara lain untuk mendeteksi MIC [50]. Ada kecenderungan untuk membuat hubungan antara bentuk lubang dan MIC [51]. Investigasi yang berbeda telah menemukan bahwa pembentukan lubang awal yang disebabkan oleh berbagai jenis bakteri memiliki karakteristik identifikasi tertentu [52]. Qian dkk., [52] dapat mengetahui dengan menggunakan berbagai mode pemindaian mikroskop elektrokimia atau SECM (*scanning electrochemical microscopy*) bahwa adanya biofilm *M. cuprina* yang mengkonsumsi Fe^{2+} dapat mempercepat keterlarutan daerah anodik dan memperparah korosi sumuran. Mereka menyimpulkan bentuk morfologi lubang ini dapat digunakan sebagai indikator MIC. Hasil investigasi korosi pada baja karbon AISI 1006 menggunakan *Acidithiobacillus ferrooxidans* dan *Citrobacter murlinae* walaupun tidak ada perbedaan yang signifikan dalam kehilangan berat, namun hasil SEM (*scanning electron microscope*) menunjukkan permukaan korosi yang kontras yakni terbentuk korosi seragam oleh *At. ferrooxidans* dan korosi sumuran oleh *C. murlinae* [53]. Hal ini menunjukkan teknik morfologi dapat mendeteksi jenis kerusakan akibat kehadiran MIC tertentu.

Sidik jari mineralogi (*mineralogical fingerprints*) memberikan cara alternatif untuk mengidentifikasi deposit mineral hasil korosi mikroba, karena beberapa mineral terbentuk dari metabolisme bakteri. Misalnya, keberadaan SRB dapat dikonfirmasi dengan adanya senyawa Fe_xS_y . Juga senyawa mangan oksida yang berbeda dapat digunakan untuk menunjukkan adanya MOB [52].

Metode mikroskopis dianggap sebagai cara termudah dan tercepat untuk mendeteksi keberadaan mikroorganisme dalam suatu sistem. Mikroskopis adalah metode kualitatif yang tidak dapat mengidentifikasi jenis mikroorganisme tertentu yang ada. Jenis mikroskop yang digunakan untuk mengidentifikasi MIC dalam suatu sistem antara lain *bright field microscope* (mikroskop medan terang), mikroskop epifluoresensi, mikroskop pemindaian laser

confocal, *atomic force* dan *electron microscopy* [54].

Teknik monitoring dan diagnostik in-situ tak merusak dapat dicapai melalui pengukuran elektrokimia dengan coupon probe karena aktivitas mikroba dan pengembangan biofilm mengubah sifat elektrokimia antarmuka. Teknik elektrokimia meliputi metode tanpa sinyal eksternal, metode dengan sinyal eksternal kecil, dan metode dengan sinyal polarisasi besar [55]. Contoh metode tanpa sinyal eksternal adalah OCP *electrochemical noise analysis*, mikrosensor dan kapasitansi untuk mengukur potensial korosi (E_{corr}) dan potensial redoks. Teknik dengan sinyal kecil adalah PR (*polarization resistance*) dan EIS (*electrochemical impedance spectroscopy*) yang memberikan informasi tentang laju korosi dan perilaku kinetik sistem. Contoh metode dengan polarisasi besar meliputi potensiodinamik [56].

Kombinasi metode dan teknik juga sering digunakan dalam menganalisa dan mengidentifikasi keberadaan MIC. Sistem assessment menggunakan metode kupon untuk mengukur laju korosi, mikrobiologi molekuler qPCR dan NGS (*next generation sequencing*) dapat mendeteksi kelompok mikroorganisme bakteri pereduksi sulfat *Desulfovibrio* dalam jumlah besar. Hasilnya telah memberikan gambaran rinci tentang status mikroba dari berbagai sistem dan lebih dapat dipercaya daripada metode MPN (*most probable number*) konvensional [49].

2.4 Mitigasi dan Pencegahan MIC

Industri minyak dan gas menggunakan langkah-langkah yang berbeda untuk mengurangi atau mengontrol MIC di jaringan pipa dan sistem infrastruktur terkait. Biokorosi atau MIC dapat ditangani dengan teknik mekanik, kimia, elektrokimia dan biologi [17].

Banyak cara pengendalian korosi secara mekanis-fisik yang didasarkan pada operasi pembersihan. Dari teknik mekanis-fisik, *pigging* adalah cara paling umum untuk pengendalian MIC. *Pig* adalah perangkat yang berjalan melalui pipa dan melakukan pembersihan dan inspeksi pada saat yang bersamaan [57]. *Pig* dijalankan untuk menghilangkan air yang terkumpul, produk korosi, biofilm, dan kotoran lainnya yang terakumulasi di dalam pipa. Fasilitas peluncur dan penerima khusus harus dirancang sebagai bagian dari sistem perpipaan untuk memungkinkan penggunaan *pig*.

Biosida sangat efektif untuk mereduksi MIC karena mempunyai kemampuan membunuh sebagian besar mikroorganisme yang hidup di dalam pipa pada umumnya. Pemanfaatan biosida

dalam industri perminyakan menyebabkan banyak masalah pencemaran serta biaya yang tidak sedikit karena mahalnya *reagent*. Biosida adalah teknik perawatan kimia yang paling umum digunakan sebagai bagian dari tindakan pengendalian MIC di industri minyak dan gas. Ada dua kelas biosida yaitu pengoksidasi dan non pengoksidasi [16]. Biosida pengoksidasi menembus dan menghancurkan sel bakteri sementara biosida non-pengoksidasi menembus biofilm dan merusak membran sel dan mengubah mekanisme mikroorganisme memperoleh energi. Contoh biosida pengoksidasi adalah klorin, brom, ozon, natrium, dan hidrogen peroksida. Contoh biosida nonpengoksidasi adalah glutaraldehid, formaldehida dan akrolein [58]. Jenis biosida pengoksidasi yang sering digunakan dalam industri minyak dan gas adalah klorin [59], sedangkan untuk nonpengoksidasi adalah glutaraldehid [60].

Perlindungan katodik (CP) dan pelapisan atau *coating* digunakan sebagai bagian dari metode elektrokimia untuk pengendalian MIC. Prinsip dasar CP adalah menerapkan arus ke permukaan yang dilindungi sementara *coating* bertindak sebagai penghalang untuk mencegah pergerakan elektron dan ion dari katoda dan anoda [61]. CP menjadikan permukaan baja bermuatan negatif sehingga menolak bakteri karena muatan permukaan bakteri juga negatif. Sementara *coating* banyak digunakan dalam industri pipa minyak dan gas untuk melindungi dari korosi internal dan eksternal. Sistem *coating* yang digunakan antara lain tar batubara, beton berbasis aspal, pelapisan seng, plastik, fiberglass dan pelapis polimer seperti *fusion bonded epoxy* [17].

Penelitian terbaru telah menyoroti potensi penggunaan jenis mikroorganisme tertentu untuk melawan jenis penyebab MIC. Uji keberhasilan telah dilakukan untuk memanfaatkan bakteri pereduksi nitrat (NRB) untuk mengendalikan SRB di sumur minyak dan sistem perpipaan [62]. Salah satu contoh metode eksklusi bio-kompetitif, memungkinkan untuk mengontrol aktivitas metabolisme beberapa strain SRB (misalnya, *Desulphovibrio desulphurican*) yang diketahui mereduksi nitrat sehingga meminimalkan kontribusi strain SRB terhadap MIC [63]. Beberapa *trend* terbaru studi teknologi pencegahan atau pengendalian MIC selain di industri migas antara lain pendekatan *quorum-sensing* [64], penggunaan rekayasa strain bakteri [16], inhibitor dan atau biosida ramah lingkungan [65], penggunaan *coating* polimer atau polimer yang mengandung antibakteri dan pengembangan material anti MIC [66].

Pendekatan *quorum-sensing* merupakan mekanisme regulasi ekspresi gen-gen atas dasar komunikasi densitas populasi mikroorganisme tertentu dengan menggunakan molekul sinyal [64]. Penghambatan *quorum-sensing* pada bakteri *Desulfovibrio vulgaris* diketahui dapat menghambat ekspresi gen-gen yang bertanggung jawab terhadap pembentukan biofilm dan biokorosi pada baja karbon [67]. Data ini menunjukkan bahwa penggunaan inhibitor *quorum-sensing* berpotensi dalam penanggulangan biokorosi logam oleh bakteri yang aktivitasnya tergantung pada sistem *quorum-sensing*. Selain pendekatan *quorum-sensing*, pencegahan MIC dapat dilakukan dengan penggunaan berbagai enzim atau metabolit yang disekresikan oleh sel sebagai pengganti untuk biosida tradisional. Beberapa organisme dapat mengeluarkan enzim atau metabolit untuk menghambat pertumbuhan pesaing bakteri target [45]. Sekresi ini memiliki toksisitas rendah dan *biodegradable*, sehingga menjadi perhatian banyak pihak dalam beberapa tahun terakhir [68]. Pengendalian biokorosi dengan rekayasa bakteri baru pada skala laboratorium sedangkan tingkat lapangan masih perlu ditingkatkan.

Penggunaan inhibitor atau biosida kimia, meskipun efektif dalam kasus-kasus tertentu, namun sisi lain masalah lingkungan dan biaya menjadi masalah untuk perkembangannya sehingga biosida ramah lingkungan yang efektif untuk jangka panjang perlu dieksplorasi. Banyak para peneliti berlomba mengeksplorasi sumber alam sebagai zat inhibitor anti korosi dan anti mikroorganisme [69]. Pengembangan inhibitor korosi ramah lingkungan pada dasarnya difokuskan pada bahan yang merupakan sumber bahan terbarukan, ketersediaan, tidak beracun, biaya rendah, proses ramah lingkungan dan produk yang dapat diterima lingkungan. Beberapa sumber biosida alami atau organik berasal dari bahan limbah, biosurfaktan, ekstrak herbal, ekstrak tumbuhan dan tanaman [69]. Senyawa antimikroba dari ekstrak tumbuhan antara lain meliputi flavonol, asam fenolik, terpen, tanin [70]. Penelitian dan pengembangan juga meliputi teknik penggunaan biosida secara mandiri maupun dicampur dengan biosida komersial [71]. Pencarian alternatif yang lebih ramah lingkungan dapat dihasilkan dengan memformulasi ulang produk yang ada atau dengan mengidentifikasi bahan kimia baru untuk mengembangkan produk yang lebih aman. Peningkatan jumlah publikasi tentang *green inhibitor* dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa topik ini menjadi fokus

penting dalam menemukan solusi masalah korosi yang lebih baik dan ramah terhadap lingkungan. Selain itu, ketersediaan tumbuhan dan tanaman sebagai sumber zat aktif yang melimpah di alam membuat penggunaan inhibitor atau biosida alam lebih prospektif untuk dikembangkan.

Sementara *coating* yang dirancang khusus untuk perlindungan jangka panjang terhadap MIC dalam aplikasi industri tampaknya terbatas. Pengujian laboratorium yang didasarkan pada kesimpulan yang lebih optimis bersifat singkat, dilakukan di media kaya nutrisi dengan kultur murni dalam wadah tertutup. Keterbatasan aplikasi modifikasi *coating* polimer untuk perlindungan MIC meliputi biaya produk dan aplikasi, kerentanan terhadap degradasi mekanis dan biologis.

3. KESIMPULAN DAN PROSPEK

MIC (*microbiologically influenced corrosion*) mempunyai dampak negatif pada integritas jaringan perpipaan dan peralatan di industri minyak dan gas. MIC menghasilkan berbagai kerusakan yang dapat menyebabkan kegagalan sehingga biaya operasional dan pemeliharaan menjadi tinggi serta produksi terganggu. MIC disebabkan oleh berbagai jenis mikroorganisme seperti SRB, IRB, APB dan MOB yang bereaksi secara bergantian atau spontan dan menghasilkan senyawa korosif melalui reaksi metabolismenya. Berbagai langkah deteksi, mitigasi dan teknologi pencegahan sedang diterapkan di industri untuk mengatasi MIC yang sangat kompleks, namun pengembangan lebih lanjut masih diperlukan. Pengembangan teknologi pencegahan MIC ini dapat mencakup penggunaan biosida organik yang ramah lingkungan untuk menggantikan biosida, pemanfaatan rekayasa strain bakteri dalam pengendalian korosi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusdiklat Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah mendanai kegiatan ini melalui program beasiswa Saintek - BRIN Tahun 2021.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. L. Skovhus, R. B. Eckert, and E. Rodrigues, "Management and control of microbiologically influenced corrosion (MIC) in the oil and gas industry-Overview and a North Sea case study," *J. Biotechnol.*, vol. 256, pp. 31-45, 2017. Doi: 10.1016/j.jbiotec.2017.07.003.

- [2] J. Ress, G. Monrrabal, A. Díaz, J. Pérez-Pérez, J. M. Bastidas, and D. M. Bastidas, "Microbiologically influenced corrosion of welded AISI 304 stainless steel pipe in well water," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 116, p. 104734, 2020. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104734.
- [3] X. Jiang, Q. Zhang, D. Qu, K. Xu, and X. Song, "Corrosion behavior of L360 N and L415 N mild steel in a shale gas gathering environment – Laboratory and on-site studies," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 82, no. July, 2020. Doi: 10.1016/j.jngse.2020.103492.
- [4] J. Wang, G. Li, H. Yin, and T. An, "Bacterial response mechanism during biofilm growth on different metal material substrates: EPS characteristics, oxidative stress and molecular regulatory network analysis," *Environ. Res.*, vol. 185, p. 109451, 2020. Doi: 10.1016/j.envres.2020.109451.
- [5] 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, 2017. Doi: 10.1016/j.ibiod.2017.08.011.
- [6] A. M. Giorgi-Pérez, A. M. Arboleda-Ordoñez, W. Villamizar-Suárez, M. Cardeñosa-Mendoza, Mauricio, R. Jaimes-Prada, B. Rincón-Orozco, and M. E Niño-Gómez, "Biofilm formation and its effects on microbiologically influenced corrosion of carbon steel in oilfield injection water via electrochemical techniques and scanning electron microscopy," *Bioelectrochemistry*, vol. 141, 2021. Doi: 10.1016/j.bioelechem.2021.107868.
- [7] P. Rajala, E. Huttunen-Saarivirta, M. Bomberg, and L. Carpén, "Corrosion and biofouling tendency of carbon steel in anoxic groundwater containing sulphate reducing bacteria and methanogenic archaea," *Corros. Sci.*, vol. 159, p. 108148, 2019. Doi: 10.1016/j.corsci.2019.108148.
- [8] Z. Zhou, T. Wu, M. Liu, B. Wang, C. Li, and F. Yin, "Accelerating role of microbial film on soil corrosion of pipeline steel," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 192, 2020, p. 104395, 2021. Doi: 10.1016/j.ijpvp.2021.104395.
- [9] F. Xie, X. Wang, D. Wang, M. Wu, C. Yu, and D. Sun, "Effect of strain rate and sulfate reducing bacteria on stress corrosion cracking behaviour of X70 pipeline steel in simulated sea mud solution," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 100, no. February, pp. 245-258, 2019. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.009.
- [10] T. Gu, D. Wang, Y. Lekbach, and D. Xu, "Extracellular electron transfer in microbial biocorrosion," *Curr. Opin. Electrochem.*, vol. 29, pp. 1-7, 2021. Doi: 10.1016/j.coelec.2021.100763.
- [11] M. Wasim, S. Shoaib, N. M. Mubarak, Inamuddin, and A. M. Asiri, "Factors influencing corrosion of metal pipes in soils," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 16, no. 3, pp. 861-879, 2018. Doi: 10.1007/s10311-018-0731-x.
- [12] A. Vigneron, I. M. Head, and N. Tsesmetzis, "Damage to offshore production facilities by corrosive microbial biofilms," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 102, no. 6, pp. 2525-2533, 2018. Doi: 10.1007/s00253-018-8808-9.
- [13] M. J. H. Gayosso, G. Z. Olivares, N. R. Ordaz, C. J. Ramirez, R. G. Esquivel, and A. P. Viveros, "Microbial consortium influence upon steel corrosion rate, using polarisation resistance and electrochemical noise techniques," *Electrochim. Acta*, vol. 49, no. 25, pp. 4295-4301, 2004. Doi: 10.1016/j.electacta.2004.03.038.
- [14] 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, 2021. Doi: 10.1016/j.jics.2021.100083.
- [15] Y. Ma, Y. Zhang, R. Zhang, F. Guan, B. Hou, and J. Duan, "Microbiologically influenced corrosion of marine steels within the interaction between steel and biofilms: a brief view," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 104, no. 2, pp. 515-525, 2020. Doi: 10.1007/s00253-019-10184-8.
- [16] R. Jia, T. Unsal, D. Xu, Y. Lekbach, and T. Gu, "Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 137, pp. 42-58, 2019. Doi: 10.1016/j.ibiod.2018.11.007.
- [17] B. J. Little, D.J. Blackwood, J. Hinks, F.M. Lauro, E. Marsili, A. Okamoto, S.A. Rice, S.A. Wade, and H.-C. Flemming, "Microbially influenced corrosion-Any progress?," *Corros. Sci.*, vol. 170, p. 108641, 2020. Doi: 10.1016/j.corsci.2020.108641.

- [18] Y. Lou, C. Weiwei, C. Tianyu, W. Jinke, Q. Hongchang, M. Lingwei, H. Xiangping, and Z. Dawei, "Microbiologically influenced corrosion inhibition mechanisms in corrosion protection: A review," *Bioelectrochemistry*, vol. 141, p. 107883, 2021. Doi: 10.1016/j.bioelechem.2021.107883.
- [19] D. Xu, R. Jia, Y. Li, and T. Gu, "Advances in the treatment of problematic industrial biofilms," *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 33, no. 5, 2017. Doi: 10.1007/s11274-016-2203-4.
- [20] J. Telegdi, A. Shaban, and L. Trif, "Microbiologically influenced corrosion (MIC)," in *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies: Production and Transmission*, Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 191-214, 2017.
- [21] W. A. Hartomo, I. N. Rizki, B. Widyanto, and S. K. Chaerun, "Microbiologically influenced corrosion (MIC) of AISI 1006 carbon steel by Acidithiobacillus ferrooxidans and desulfovibrio piger," in *The Third International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS)*, pp. 895-905, 2010.
- [22] K. F. Al-Sultani, Z. T. Khulief, and A. A. Hasan, "Characterization of microbiological influence corrosion for API 5L X46 pipeline by sulphate-reducing bacteria (SRB)," *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 2169-2176, 2021. Doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.301.
- [23] D. Enning and J. Garrelfs, "Corrosion of iron by sulfate-reducing bacteria: New views of an old problem," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 80, no. 4, pp. 1226-1236, 2014. Doi: 10.1128/AEM.02848-13.
- [24] M. K. Khouzani, A. Bahrami, A. Hosseini-Abari, M. Khandouzi, and P. Taheri, "Microbiologically influenced corrosion of a pipeline in a petrochemical plant," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 4, pp. 1-14, 2019. Doi: 10.3390/met9040459.
- [25] A. M. El-Shamy, "A review on: Biocidal activity of some chemical structures and their role in mitigation of microbial corrosion," *Egypt. J. Chem.*, vol. 63, no. 12, pp. 5251-5267, 2020. Doi: 10.21608/ejchem.2020.32160.2683.
- [26] C. A. Loto, "Microbiological corrosion: mechanism, control and impact-a review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 9-12, pp. 4241-4252, 2017. Doi: 10.1007/s00170-017-0494-8.
- [27] H. Liu, C. Fu, T. Gu, G. Zhang, Y. Lv, H. Wang, and H. Liu, "Corrosion behavior of carbon steel in the presence of sulfate reducing bacteria and iron oxidizing bacteria cultured in oilfield produced water," *Corros. Sci.*, vol. 100, pp. 484-495, 2015. Doi: 10.1016/j.corsci.2015.08.023.
- [28] F. Tian, X. He, X. Bai, and C. Yuan, "Electrochemical corrosion behaviors and mechanism of carbon steel in the presence of acid-producing bacterium citrobacter farmeri in artificial seawater," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 147, no. January 2019, p. 104872, 2020. Doi: 10.1016/j.ibiod.2019.104872.
- [29] H. Liu, T. Gu, M. Asif, G. Zhang, and H. Liu, "The corrosion behavior and mechanism of carbon steel induced by extracellular polymeric substances of iron-oxidizing bacteria," *Corros. Sci.*, vol. 114, pp. 102-111, 2017. Doi: 10.1016/j.corsci.2016.10.025.
- [30] D. Zak, M. Hupfer, A. Cabezas, G. Jurasinski, J. Audet, A. Kleeberg, R. McInnes, S. M. Kristiansen, R. J. Petersen, H. Liu, and T. Goldhammer, "Sulphate in freshwater ecosystems: A review of sources, biogeochemical cycles, ecotoxicological effects and bioremediation," *Earth-Science Rev.*, vol. 212, 2021. Doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103446.
- [31] X. X. Li, J. F. Liu, F. Yao, W. L. Wu, S. Z. Yang, S. M. Mbadinga, J. D. Gu, and B. Z. Mu, "Dominance of desulfotignum in sulfate-reducing community in high sulfate production-water of high temperature and corrosive petroleum reservoirs," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 114, pp. 45-56, 2016. Doi: 10.1016/j.ibiod.2016.05.018.
- [32] M. Wasim and M. B. Djukic, "Long-term external microbiologically influenced corrosion of buried cast iron pipes in the presence of sulfate-reducing bacteria (SRB)," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 115, no. March, p. 104657, 2020. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104657.
- [33] Q. Bao, D. Zhang, D. Lv, and P. Wang, "Effects of two main metabolites of sulphate-reducing bacteria on the corrosion of Q235 steels in 3.5wt.% NaCl media," *Corros. Sci.*, vol. 65, pp. 405-413, 2012. Doi: 10.1016/j.corsci.2012.08.044.
- [34] J. Starosvetsky, R. Kamari, Y. Farber, D. Bilanović, and R. Armon, "Rust dissolution and removal by iron-reducing bacteria: A

- potential rehabilitation of rusted equipment,” *Corros. Sci.*, vol. 102, pp. 446-454, 2016. Doi: 10.1016/j.corsci.2015.10.037.
- [35] N. Wurzler, J. D. Schutter, R. Wagner, M. Dimper, D. Lützenkirchen-Hecht, and O. Ozcan, “Trained to corrode: Cultivation in the presence of Fe(III) increases the electrochemical activity of iron reducing bacteria – An in situ electrochemical XANES study,” *Electrochem. commun.*, vol. 112, no. January, p. 106673, 2020. Doi: 10.1016/j.elecom.2020.106673.
- [36] L. K. Herrera and H. A. Videla, “Role of iron-reducing bacteria in corrosion and protection of carbon steel,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 63, no. 7, pp. 891-895, 2009. Doi: 10.1016/j.ibiod.2009.06.003.
- [37] A. Kappler and C. Bryce, “Cryptic biogeochemical cycles: unravelling hidden redox reactions,” *Environ. Microbiol.*, vol. 19, no. 3, pp. 842-846, 2017. Doi: 10.1111/1462-2920.13687.
- [38] Z. Shahryari, K. Gheisari, and H. Motamedi, “Effect of sulfate reducing *Citrobacter* sp. strain on the corrosion behavior of API X70 microalloyed pipeline steel,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 236, no. July, p. 121799, 2019. Doi: 10.1016/j.matchemphys.2019.121799.
- [39] B. J. Little, J. Hinks, and D. J. Blackwood, “Microbially influenced corrosion: Towards an interdisciplinary perspective on mechanisms,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 154, no. August, p. 105062, 2020. Doi: 10.1016/j.ibiod.2020.105062.
- [40] H. Ashassi-Sorkhabi, M. Moradi-Haghighi, and G. Zarrini, “The effect of *Pseudoxanthomonas* sp. as manganese oxidizing bacterium on the corrosion behavior of carbon steel,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 32, no. 2, pp. 303-309, 2012. Doi: 10.1016/j.msec.2011.10.033.
- [41] A. Rajasekar, T. Ganesh Babu, S. Karutha Pandian, S. Maruthamuthu, N. Palaniswamy, and A. Rajendran, “Biodegradation and corrosion behavior of manganese oxidizer *Bacillus cereus* ACE4 in diesel transporting pipeline,” *Corros. Sci.*, vol. 49, no. 6, pp. 2694-2710, 2007. Doi: 10.1016/j.corsci.2006.12.004.
- [42] K. M. Usher, A. H. Kaksonen, I. Cole, and D. Marney, “Critical review: Microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 93, pp. 84-106, 2014. Doi: 10.1016/j.ibiod.2014.05.007.
- [43] V. Carniello, B. W. Peterson, H. C. van der Mei, and H. J. Busscher, “Physico-chemistry from initial bacterial adhesion to surface-programmed biofilm growth,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 261, pp. 1-14, 2018. Doi: 10.1016/j.cis.2018.10.005.
- [44] M. Krsmanovic, D. Biswas, H. Ali, A. Kumar, R. Ghosh, and A. K. Dickerson, “Hydrodynamics and surface properties influence biofilm proliferation,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 288, 2021. Doi: 10.1016/j.cis.2020.102336.
- [45] . Li and C. Ning, “Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling,” *Bioact. Mater.*, vol. 4, no. January 2019, pp. 189–195, 2019. Doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.04.003.
- [46] NACE International, *Standard Test Method TM0194: Field Monitoring of Bacterial Growth in Oilfield Systems*, 2014th ed. Texas: NACE International, 2014.
- [47] NACE International, *Standard Test Method TM0212: Detection , Testing , and Evaluation of Microbiologically Influenced Corrosion on Internal Surfaces of Pipelines*, vol. TM0212, no. 21260. Texas: NACE International, 2018.
- [48] S. P. Kotu, M. S. Mannan, and A. Jayaraman, “Emerging molecular techniques for studying microbial community composition and function in microbiologically influenced corrosion,” *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 144, p. 104722, 2019. Doi: 10.1016/j.ibiod.2019.104722.
- [49] B. Senthilmurugan, J. S. Radhakrishnan, M. Poulsen, L. Tang, and S. AlSaber, “Assessment of microbiologically influenced corrosion in oilfield water handling systems using molecular microbiology methods,” *Upstream Oil Gas Technol.*, vol. 7, p. 100041, 2021. Doi: 10.1016/j.upstre.2021.100041.
- [50] Y. Li, S. Feng, H. Liu, X. Tian, Y. Xia, M. Li, K. Xu, H. Yu, Q. Liu, and C. Chen, “Bacterial distribution in SRB biofilm affects MIC pitting of carbon steel studied using FIB-SEM,” *Corros. Sci.*, vol. 167, 2020. Doi: 10.1016/j.corsci.2020.108512.
- [51] X. Wang and R. E. Melchers, “Long-term under-deposit pitting corrosion of carbon steel pipes,” *Ocean Eng.*, vol. 133, no. February, pp. 231-243, 2017. Doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.02.010.

- [52] H. C. Qian, W.W. Chang, T.Y. Cui, Z. Li, D.W. Guo, C.T. Kwok, L.M. Tam, and D. W. Zhang, "Multi-mode scanning electrochemical microscopic study of microbiologically influenced corrosion mechanism of 304 stainless steel by thermoacidophilic archaea," *Corros. Sci.*, vol. 191, 2021. Doi: 10.1016/j.corsci.2021.109751.
- [53] B. Widyanto, S. K. Chaerun, W. A. Hartomo, and I. N. Rizki, "Biocorrosion behavior of AISI 1006 carbon steel protected by biofilm of bacillus subtilis by an iron-oxidizing bacterium and a sulfate-reducing bacterium," *J. Bio- Tribo-Corrosion*, vol. 6, no. 6, pp. 1-9, 2020. Doi: 10.1007/s40735-019-0301-1.
- [54] C. Cardell and I. Guerra, "An overview of emerging hyphenated SEM-EDX and Raman spectroscopy systems: Applications in life, environmental and materials sciences," *TrAC - Trends Anal. Chem.*, vol. 77, pp. 156-166, 2016. Doi: 10.1016/j.trac.2015.12.001.
- [55] R. Jia, D. Yang, H. Bin Abd Rahman, and T. Gu, "Laboratory testing of enhanced biocide mitigation of an oilfield biofilm and its microbiologically influenced corrosion of carbon steel in the presence of oilfield chemicals," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 125, pp. 116-124, 2017. Doi: 10.1016/j.ibiod.2017.09.006.
- [56] T. Unsal, R. Jia, S. Kumseranee, S. Punpruk, and T. Gu, "Laboratory investigation of microbiologically influenced corrosion of carbon steel in hydrotest using enriched artificial seawater inoculated with an oilfield biofilm consortium," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 100, no. September 2018, pp. 544-555, 2019. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.053.
- [57] C. Cote, O. Rosas, M. Szttyler, J. Doma, I. Beech, and R. Basseguy, "Corrosion of low carbon steel by microorganisms from the 'pigging' operation debris in water injection pipelines," *Bioelectrochemistry*, vol. 97, pp. 97-109, 2014. Doi: 10.1016/j.bioelechem.2013.11.001.
- [58] A. H. Alamri, "Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines - An overview," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 116, p. 104735, 2020. Doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104735.
- [59] C. C. Okoro, "The biocidal efficacy of chlorine dioxide (ClO₂) in the control of oil field reservoir souring and bio-corrosion in the oil and gas industries," *Pet. Sci. Technol.*, vol. 33, no. 2, pp. 170-177, 2015. Doi: 10.1080/10916466.2014.908913.
- [60] B. Akyon, D. Lipus, and K. Bibby, "Glutaraldehyde inhibits biological treatment of organic additives in hydraulic fracturing produced water," *Sci. Total Environ.*, vol. 666, pp. 1161-1168, 2019. Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.056.
- [61] M. Lv and M. Du, "A review: microbiologically influenced corrosion and the effect of cathodic polarization on typical bacteria," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 17, no. 3, pp. 431-446, 2018. Doi: 10.1007/s11157-018-9473-2.
- [62] Kamarisima, K. Miyanaga, and Y. Tanji, "The utilization of aromatic hydrocarbon by nitrate- and sulfate-reducing bacteria in single and multiple nitrate injection for souring control," *Biochem. Eng. J.*, vol. 143, no. July 2018, pp. 75-80, 2019. Doi: 10.1016/j.bej.2018.12.006.
- [63] A. Halim, E. Watkin, and R. Gubner, "Short term corrosion monitoring of carbon steel by bio-competitive exclusion of thermophilic sulphate reducing bacteria and nitrate reducing bacteria," *Electrochim. Acta*, vol. 77, pp. 348-362, 2012. Doi: 10.1016/j.electacta.2012.06.040.
- [64] A. Muras, A. Parga, C. Mayer, and A. Otero, "Use of quorum sensing inhibition strategies to control microfouling," *Mar. Drugs*, vol. 19, no. 2, 2021. Doi: 10.3390/md19020074.
- [65] M. Z. M. Salem, M. El-Hefny, H. M. Ali, A. Abdel-Megeed, A. A. A. El-Settawy, M. Bohm, M. M.A. Mansour, and A. Z.M. Salem, "Plants-derived bioactives: Novel utilization as antimicrobial, antioxidant and phyto-reducing agents for the biosynthesis of metallic nanoparticles," *Microb. Pathog.*, vol. 158, no. July, pp. 18-25, 2021. Doi: 10.1016/j.micpath.2021.105107.
- [66] P. A. Rasheed, K. A. Jabbar, H. R. Mackey, and K. A. Mahmoud, "Recent advancements of nanomaterials as coatings and biocides for the inhibition of sulfate reducing bacteria induced corrosion," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, vol. 25, pp. 35-42, 2019. Doi: 10.1016/j.coche.2019.06.003.
- [67] G. Scarascia, R. Lehmann, L. L. Machuca, C. Morris, K. Y. Cheng, A. Kaksonen, and P. Y. Hong, "Effect of quorum sensing on the ability of *Desulfovibrio vulgaris* to form biofilms and to biocorrode carbon steel in saline conditions," *Appl. Environ.*

Microbiol., vol. 86, no. 1, pp. 1-14, 2020.
Doi: 10.1128/AEM.01664-19.

- [68] K. Ueda and D. Uemura, "Bioactive marine metabolites from Okinawan waters," *Stud. Nat. Prod. Chem.*, vol. 35, no. C, pp. 57-100, 2008. Doi: 10.1016/S1572-5995(08)80004-X.
- [69] W. S. Md Zain, N. I. Hairul Salleh, and A. Abdullah, "Natural biocides for mitigation of sulphate reducing bacteria," *Int. J. Corros.*, vol. 2018, pp. 1-7, 2018. Doi: 10.1155/2018/3567569.
- [70] Y. Lekbach, D. Xu, S. E. Abed, Y. Dong, D. Liu, M. S. Khan, S. I. Koraichi, and K. Yang, "Mitigation of microbiologically influenced corrosion of 304L stainless steel in the presence of *Pseudomonas aeruginosa* by *Cistus ladanifer* leaves extract," *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, vol. 133, pp. 159-169, 2018. Doi: 10.1016/j.ibiod.2018.07.003.
- [71] M. Sharma, H. Liu, S. Chen, F. Cheng, G. Voordouw, and L. Gieg, "Effect of selected biocides on microbiologically influenced corrosion caused by *Desulfovibrio ferrophilus* IS5," *Sci. Rep.*, vol. 8, no. 1, pp. 1-12, 2018. Doi: 10.1038/s41598-018-34789-7.