Department of Digital Business
Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)
Homepage: https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS
Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 23842-23853
P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Perkembangan Strategi Mitigasi Korosi pada Struktur Minyak dan Gas Lepas Pantai Selama Dua Dekade (2006–2026): Kajian Literatur

Muhammad Fatih Shabir[1], Nuryanto[2], Puji Astuti Ibrahim[3]
[123]D3-Teknik Kimia, Institut Teknologi Petroleum Balongan
nuryantooryan@gmail.com

Abstrak

Korosi merupakan penyebab utama degradasi struktur pada industri minyak dan gas lepas pantai akibat lingkungan laut yang sangat agresif. Paparan ion klorida, oksigen terlarut, kelembapan tinggi, fluktuasi temperatur, arus laut, dan aktivitas mikroorganisme mempercepat reaksi elektrokimia sehingga memicu berbagai bentuk korosi, seperti uniform corrosion, pitting corrosion, crevice corrosion, galvanic corrosion, erosion-corrosion, corrosion fatigue, dan microbiologically influenced corrosion (MIC). Kompleksitas mekanisme tersebut menuntut penerapan strategi mitigasi yang terintegrasi dan tidak hanya mengandalkan satu metode perlindungan. Penelitian ini bertujuan mengkaji perkembangan strategi mitigasi korosi pada struktur minyak dan gas lepas pantai selama periode 2006–2026 menggunakan metode kajian literatur. Sumber pustaka diperoleh dari Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis, MDPI, serta Google Scholar. Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan mengelompokkan pembahasan ke dalam enam aspek, yaitu mekanisme korosi, protective coating, cathodic protection, corrosion inhibitor, material selection, dan pemanfaatan teknologi digital, seperti Artificial Intelligence (AI), Digital Twin, Structural Health Monitoring (SHM), Internet of Things (IoT), serta predictive maintenance. Hasil kajian menunjukkan bahwa strategi mitigasi korosi telah berkembang dari pendekatan perlindungan material konvensional menuju sistem pengelolaan korosi yang terintegrasi dan berbasis data. Integrasi teknologi digital meningkatkan efektivitas perlindungan melalui pemantauan kondisi secara real-time, prediksi laju korosi, dan pengambilan keputusan pemeliharaan secara prediktif. Kajian ini mengusulkan konsep Integrated Smart Corrosion Management sebagai kerangka konseptual untuk mendukung pengelolaan integritas aset pada industri minyak dan gas lepas pantai.

Kata Kunci: *Artificial Intelligence, Digital Twin, Korosi, Mitigasi Korosi, Struktur Lepas Pantai.*

1. Latar Belakang

Industri minyak dan gas lepas pantai merupakan salah satu sektor strategis yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan energi global. Seiring dengan menurunnya cadangan hidrokarbon di daratan, kegiatan eksplorasi dan eksploitasi semakin bergeser menuju wilayah laut dengan kondisi operasi yang lebih kompleks, mulai dari perairan dangkal hingga laut dalam (*deep water*) dan *ultra-deep water*. Perkembangan tersebut mendorong pembangunan berbagai infrastruktur lepas pantai, seperti *fixed platform*, *floating production system*, *subsea pipeline*, *riser*, *wellhead*, dan berbagai fasilitas pendukung lainnya yang dirancang untuk beroperasi dalam jangka waktu puluhan tahun. Oleh karena itu, keberhasilan operasi tidak hanya ditentukan oleh kapasitas produksi, tetapi juga oleh kemampuan struktur dalam mempertahankan integritasnya selama umur layan (Melchera R E et al, 2024; Kassinis C et al, 2025).

Korosi masih menjadi penyebab dominan degradasi material pada struktur minyak dan gas lepas pantai. Lingkungan laut memiliki karakteristik yang sangat agresif karena mengandung ion klorida dengan konsentrasi tinggi, oksigen terlarut, kelembapan yang relatif konstan, fluktuasi temperatur, arus laut, serta aktivitas mikroorganisme yang secara bersamaan mempercepat reaksi elektrokimia pada permukaan logam. Kondisi tersebut menyebabkan struktur offshore tidak hanya mengalami korosi merata (*uniform corrosion*), tetapi juga berbagai bentuk korosi lokal, seperti *pitting corrosion*, *crevice corrosion*, *galvanic corrosion*, *erosion-corrosion*, *corrosion fatigue*, hingga *microbiologically influenced corrosion* (MIC). Keberagaman mekanisme korosi tersebut menunjukkan bahwa strategi pengendalian korosi tidak dapat bergantung pada satu metode perlindungan saja, melainkan memerlukan pendekatan yang saling melengkapi (Melchera R E et al, 2024; Liu P et al, 2023.; Kassinis C et al, 2025; Xia R et al, 2024.).

Dampak korosi tidak hanya terbatas pada penurunan kualitas material, tetapi juga memengaruhi aspek keselamatan, ekonomi, dan keberlanjutan operasi. Penurunan ketebalan material akibat korosi dapat mengurangi kemampuan struktur dalam menahan beban sehingga meningkatkan risiko kegagalan konstruksi. Selain menyebabkan meningkatnya biaya inspeksi, pemeliharaan, dan penggantian komponen, korosi juga berpotensi mengakibatkan penghentian produksi, kebocoran hidrokarbon, serta pencemaran lingkungan laut. Secara global, kerugian ekonomi akibat korosi diperkirakan mencapai sekitar US$2,5 triliun per tahun atau sekitar 3,4% dari produk domestik bruto (PDB) dunia, sehingga pengendalian korosi menjadi salah satu aspek penting dalam pengelolaan integritas aset industri (Melchera R E et al, 2024; Xia R et al, 2024.).

Selama dua dekade terakhir, berbagai strategi mitigasi telah dikembangkan untuk mengurangi dampak korosi pada struktur lepas pantai. Pendekatan yang paling banyak diterapkan meliputi penggunaan *protective coating*, *cathodic protection*, *corrosion inhibitor*, serta pemilihan material tahan korosi (*corrosion-resistant alloys*). Masing-masing metode memiliki mekanisme perlindungan yang berbeda, namun saling melengkapi dalam memberikan perlindungan terhadap struktur. Perkembangan penelitian menunjukkan bahwa inovasi tidak lagi hanya difokuskan pada peningkatan efektivitas masing-masing metode, tetapi juga pada pengembangan *smart coating*, pemanfaatan nanomaterial, *green corrosion inhibitor*, material berkinerja tinggi, serta optimasi sistem *cathodic protection* (Liang H et al, 2024.; Guo Z, et al 2021; Loana D, et al 2025; Reda A, et al 2025).

Di sisi lain, perkembangan teknologi digital telah mengubah paradigma pengelolaan korosi pada industri minyak dan gas lepas pantai. Pendekatan pemeliharaan yang sebelumnya didominasi oleh *time-based maintenance* mulai bergeser menuju *condition-based maintenance* dan *predictive maintenance* melalui pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI), *Machine Learning*, *Digital Twin*, *Structural Health Monitoring* (SHM), *Internet of Things* (IoT), serta analisis data secara berkelanjutan. Integrasi teknologi tersebut memungkinkan kondisi struktur dipantau secara *real-time*, laju korosi diprediksi dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi, serta keputusan pemeliharaan dilakukan berdasarkan kondisi aktual aset. Pergeseran ini menunjukkan bahwa mitigasi korosi telah berkembang dari sekadar perlindungan material menjadi bagian integral dari sistem pengelolaan aset yang cerdas dan berbasis data (Imran H.M, et al 2023).

Meskipun publikasi mengenai mitigasi korosi terus meningkat, sebagian besar penelitian maupun artikel tinjauan masih membahas setiap metode secara terpisah. Kajian mengenai *protective coating*, *cathodic protection*, *corrosion inhibitor*, pemilihan material, maupun teknologi digital umumnya hanya berfokus pada perkembangan masing-masing bidang. Padahal, dalam praktik industri, keberhasilan pengendalian korosi hampir selalu diperoleh melalui penerapan beberapa metode secara terpadu sesuai karakteristik struktur, kondisi lingkungan, serta target umur layanan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa masih diperlukan suatu kajian yang mampu mengintegrasikan perkembangan berbagai strategi mitigasi korosi dalam satu pembahasan yang komprehensif sehingga hubungan antarmetode dapat dipahami secara lebih utuh.

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan untuk mengkaji perkembangan strategi mitigasi korosi pada struktur minyak dan gas lepas pantai selama periode 2006–2026 melalui pendekatan kajian literatur. Pembahasan difokuskan pada mekanisme korosi di lingkungan laut, perkembangan *protective coating*, *cathodic protection*, *corrosion inhibitor*, pemilihan material tahan korosi, serta implementasi teknologi digital seperti *Artificial Intelligence*, *Digital Twin*, dan *predictive maintenance*. Selain menyajikan perkembangan masing-masing teknologi, artikel ini juga memberikan analisis komparatif mengenai keunggulan, keterbatasan, serta potensi integrasi berbagai metode dalam mendukung konsep **Integrated Smart Corrosion Management** sebagai arah pengembangan sistem mitigasi korosi pada industri minyak dan gas lepas pantai di masa mendatang.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode **kajian literatur (*literature review*)** dengan pendekatan deskriptif-komparatif untuk menganalisis perkembangan strategi mitigasi korosi pada struktur minyak dan gas lepas pantai selama periode 2006–2026. Kajian dilakukan melalui proses identifikasi, seleksi, evaluasi, dan sintesis berbagai artikel ilmiah yang membahas mekanisme korosi, teknologi mitigasi, serta perkembangan teknologi digital dalam pengelolaan korosi.

Pencarian literatur dilakukan menggunakan beberapa basis data ilmiah bereputasi, yaitu Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis, MDPI, serta Google Scholar sebagai sumber pendukung. Kata kunci yang digunakan meliputi *offshore corrosion*, *marine corrosion*, *protective coating*, *cathodic*

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

protection, *corrosion inhibitor*, *corrosion-resistant alloy*, *duplex stainless steel*, *digital twin*, *artificial intelligence*, *predictive maintenance*, dan *asset integrity management*. Pemilihan kata kunci tersebut bertujuan untuk memperoleh literatur yang relevan dengan perkembangan strategi mitigasi korosi pada industri minyak dan gas lepas pantai.

Literatur yang digunakan memenuhi beberapa kriteria inklusi, yaitu: (1) dipublikasikan pada periode 2006–2026 dengan prioritas publikasi tahun 2021–2026; (2) berasal dari jurnal internasional bereputasi maupun jurnal nasional yang relevan; (3) membahas mekanisme korosi, metode mitigasi, atau teknologi digital yang diterapkan pada lingkungan laut dan industri minyak serta gas; dan (4) memiliki informasi yang memadai untuk mendukung proses sintesis. Sebaliknya, artikel yang tidak berkaitan secara langsung dengan korosi di lingkungan laut, tidak melalui proses *peer review*, atau hanya berupa ringkasan konferensi tanpa pembahasan teknis yang memadai tidak dimasukkan dalam kajian ini.

Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan pendekatan **analisis tematik (*thematic analysis*)**. Setiap artikel dikelompokkan ke dalam enam topik utama, yaitu: (1) mekanisme korosi pada struktur lepas pantai, (2) *protective coating*, (3) *cathodic protection*, (4) *corrosion inhibitor*, (5) *material selection*, dan (6) teknologi digital yang meliputi *Artificial Intelligence*, *Digital Twin*, *Structural Health Monitoring* (SHM), *Internet of Things* (IoT), serta *predictive maintenance*. Selanjutnya dilakukan analisis komparatif untuk mengidentifikasi perkembangan teknologi, keunggulan, keterbatasan, tantangan implementasi, serta arah penelitian pada masing-masing strategi mitigasi.

Tahap akhir penelitian berupa sintesis konseptual yang mengintegrasikan seluruh hasil analisis ke dalam suatu kerangka **Integrated Smart Corrosion Management**. Kerangka tersebut disusun berdasarkan keterkaitan antarmetode mitigasi korosi yang ditemukan pada berbagai literatur sehingga mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai arah perkembangan sistem pengelolaan korosi pada industri minyak dan gas lepas pantai.

3. Hasil dan Diskusi

a. Corrosion Mechanism

Korosi pada struktur minyak dan gas lepas pantai merupakan proses degradasi material yang dipengaruhi oleh interaksi berbagai faktor fisik, kimia, mekanik, dan biologis yang berlangsung secara simultan. Berbeda dengan struktur yang beroperasi di lingkungan darat, fasilitas lepas pantai mengalami paparan lingkungan laut yang sangat agresif sehingga mekanisme korosi menjadi lebih kompleks. Oleh karena itu, korosi pada struktur offshore tidak dapat dipandang sebagai proses elektrokimia sederhana, tetapi sebagai fenomena multidisiplin yang terus berkembang selama umur operasi struktur (Melchera R E et al, 2024; Kassinis C et al, 2025; Xia R et al, 2024.).

Lingkungan laut memiliki karakteristik yang mempercepat terjadinya korosi, antara lain kandungan ion klorida yang tinggi, oksigen terlarut, kelembapan yang relatif konstan, variasi temperatur, arus laut, serta aktivitas mikroorganisme. Ion klorida mampu merusak lapisan pasif pada permukaan logam sehingga mempercepat inisiasi korosi lokal. Di sisi lain, perubahan temperatur dan kecepatan aliran fluida memengaruhi kinetika reaksi elektrokimia melalui peningkatan perpindahan massa, sedangkan aktivitas mikroorganisme dapat mengubah kondisi kimia lokal pada permukaan logam sehingga menghasilkan mekanisme korosi yang berbeda dibandingkan korosi elektrokimia konvensional (Melchera R E et al, 2024; Liu P et al, 2023.; Kassinis C et al, 2025).

Secara elektrokimia, proses korosi diawali oleh terbentuknya daerah anoda dan katoda pada permukaan logam. Pada daerah anoda terjadi reaksi oksidasi yang menyebabkan logam melepaskan elektron dan berubah menjadi ion logam, sedangkan pada daerah katoda berlangsung reaksi reduksi yang memanfaatkan elektron tersebut. Kedua reaksi berlangsung secara simultan sehingga menghasilkan produk korosi yang terus berkembang selama struktur berada pada lingkungan korosif. Walaupun mekanisme dasarnya relatif sederhana, penelitian menunjukkan bahwa variasi salinitas, kandungan oksigen, temperatur, dan karakteristik aliran menyebabkan laju korosi dapat berbeda secara signifikan pada setiap bagian struktur offshore (Melchera R E et al, 2024; Kassinis C et al, 2025).

Karakteristik lain yang membedakan struktur lepas pantai adalah keberadaannya pada beberapa zona paparan dengan tingkat korosivitas yang berbeda, yaitu *atmospheric zone*, *splash zone*, *tidal zone*, dan *submerged zone*. *Splash zone* umumnya merupakan area dengan tingkat korosi tertinggi akibat siklus basah–kering yang

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

berlangsung secara berulang sehingga meningkatkan konsentrasi garam pada permukaan logam. Sebaliknya, *submerged zone* lebih dipengaruhi oleh kandungan oksigen terlarut, arus laut, dan aktivitas biologis. Perbedaan karakteristik tersebut menyebabkan strategi mitigasi korosi tidak dapat diterapkan secara seragam, tetapi harus disesuaikan dengan kondisi lingkungan pada masing-masing zona (Melchera R E et al, 2024; Kassinis C et al, 2025).

Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian penelitian semakin meningkat terhadap *Microbiologically Influenced Corrosion* (MIC) sebagai salah satu mekanisme utama degradasi struktur bawah laut. Mikroorganisme, khususnya *sulfate-reducing bacteria* (SRB), mampu membentuk biofilm pada permukaan logam dan menghasilkan metabolit yang mengubah kondisi elektrokimia lokal. Akibatnya, laju korosi meningkat dan memicu terbentuknya *pitting corrosion* yang berkembang secara tersembunyi. Dibandingkan korosi merata, *pitting corrosion* memiliki tingkat bahaya yang lebih tinggi karena mampu menyebabkan perforasi material dalam waktu relatif singkat meskipun kehilangan massa logam secara keseluruhan relatif kecil (Liu P et al, 2023; Shittu A. A et al, 2020).

Selain MIC, penelitian menunjukkan bahwa struktur offshore umumnya mengalami lebih dari satu mekanisme korosi secara bersamaan. *Uniform corrosion*, *pitting corrosion*, *crevice corrosion*, *galvanic corrosion*, *erosion-corrosion*, dan *corrosion fatigue* dapat saling berinteraksi sehingga mempercepat degradasi material. Sebagai contoh, *pitting corrosion* sering menjadi titik awal terbentuknya retak akibat pembebanan siklik yang kemudian berkembang menjadi *corrosion fatigue*. Oleh karena itu, evaluasi integritas struktur tidak cukup dilakukan berdasarkan laju korosi rata-rata, tetapi juga harus mempertimbangkan interaksi antar mekanisme degradasi yang terjadi selama operasi (Xia R et al, 2024; Shittu A. A et al, 2020).

Berdasarkan berbagai hasil penelitian tersebut, dapat dipahami bahwa korosi pada struktur minyak dan gas lepas pantai merupakan fenomena yang sangat kompleks dan dipengaruhi oleh banyak variabel yang saling berinteraksi. Kompleksitas tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode perlindungan yang mampu mengendalikan seluruh bentuk korosi secara efektif. Oleh karena itu, strategi mitigasi modern dikembangkan melalui pendekatan berlapis (*multi-layer protection strategy*) yang mengombinasikan perlindungan fisik, elektrokimia, kimia, pemilihan material, serta teknologi digital. Pemahaman mengenai mekanisme korosi ini menjadi dasar dalam pengembangan berbagai strategi mitigasi yang dibahas pada bagian berikutnya.

b. Protective Coating

Protective coating merupakan metode mitigasi korosi yang paling luas diterapkan pada industri minyak dan gas lepas pantai karena berfungsi sebagai penghalang (*barrier protection*) yang memisahkan permukaan logam dari lingkungan korosif. Dengan menghambat kontak langsung antara logam dan media korosif, seperti air laut, oksigen terlarut, serta ion klorida, lapisan pelindung mampu memperlambat berlangsungnya reaksi elektrokimia penyebab korosi. Dibandingkan metode perlindungan lainnya, *protective coating* memiliki keunggulan berupa kemudahan aplikasi, fleksibilitas penggunaan pada berbagai jenis struktur, serta biaya implementasi yang relatif lebih rendah. Oleh karena itu, sistem pelapisan masih menjadi garis pertahanan pertama (*first line of defense*) dalam perlindungan struktur offshore(Liang H et al, 2024; Bogatu N, et al 2025).

Meskipun prinsip kerjanya relatif sederhana, efektivitas *protective coating* sangat dipengaruhi oleh karakteristik lapisan pelindung yang digunakan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kegagalan sistem pelapisan umumnya tidak disebabkan oleh rendahnya ketahanan kimia material, melainkan akibat penetrasi air dan ion klorida melalui pori-pori lapisan, terbentuknya *microcrack*, kehilangan daya lekat (*adhesion loss*), serta kerusakan mekanis selama operasi. Kondisi tersebut memungkinkan media korosif mencapai permukaan logam sehingga korosi berkembang di bawah lapisan pelindung (*underfilm corrosion*) yang sering kali sulit dideteksi pada tahap awal (Liang H et al, 2024; Hao J, et al 2025).

Perkembangan teknologi pelapisan menunjukkan adanya pergeseran dari sistem pelapis konvensional menuju sistem pelapisan berlapis (*multi-layer coating system*). Umumnya, sistem ini terdiri atas lapisan primer yang memberikan daya lekat terhadap substrat, lapisan antara (*intermediate coat*) yang meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi media korosif, serta *top coat* yang melindungi lapisan di bawahnya dari radiasi ultraviolet, abrasi, dan pengaruh cuaca. Pendekatan multilapis terbukti mampu meningkatkan umur perlindungan dibandingkan penggunaan lapisan tunggal karena setiap lapisan memiliki fungsi perlindungan yang saling melengkapi (Liang H et al, 20241; Bogatu N, et al 2025; Hao J, et al 2025).

Selain pengembangan sistem multilapis, penelitian juga banyak difokuskan pada penggunaan *zinc-rich coating* dan material berbasis nanoteknologi. *Zinc-rich coating* mampu memberikan perlindungan melalui mekanisme penghalang sekaligus perlindungan elektrokimia karena partikel seng berfungsi sebagai anoda korban (*sacrificial anode*). Sementara itu, penambahan nanopartikel seperti silika, alumina, karbon nanotube, maupun graphene ke

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

dalam matriks epoksi terbukti meningkatkan kekuatan mekanik, menurunkan permeabilitas terhadap air dan ion klorida, serta memperpanjang umur perlindungan lapisan. Di antara berbagai nanomaterial tersebut, graphene menjadi salah satu material yang paling menjanjikan karena mampu membentuk jalur difusi yang menghambat penetrasi media korosif menuju permukaan logam (Zhang w, et al 2024; Hao J, et al 2025; Tian Y, et al. 2021).

Meskipun menunjukkan perkembangan yang sangat pesat, sistem *protective coating* tetap memiliki sejumlah keterbatasan. Keberhasilannya sangat dipengaruhi oleh kualitas *surface preparation*, metode aplikasi, ketebalan lapisan, serta kondisi lingkungan selama proses pelapisan. Oleh karena itu, efektivitas *protective coating* tidak hanya ditentukan oleh jenis material pelapis yang digunakan, tetapi juga oleh kualitas proses aplikasi dan sistem inspeksi selama masa operasi (Liang H et al, 2024; Bogatu N, et al 2025).

Hasil sintesis berbagai penelitian menunjukkan bahwa perkembangan *protective coating* telah bergeser dari sekadar sistem pelindung pasif menjadi material multifungsi yang mampu memberikan perlindungan fisik, kimia, dan elektrokimia secara bersamaan. Namun demikian, tidak ada sistem pelapisan yang mampu memberikan perlindungan sempurna sepanjang umur layanan struktur. Oleh karena itu, dalam praktik industri, *protective coating* hampir selalu dikombinasikan dengan *cathodic protection* untuk menghasilkan sistem perlindungan yang lebih andal. Integrasi kedua metode tersebut menjadi dasar pengembangan strategi mitigasi korosi modern yang akan dibahas pada bagian berikutnya.

c. Cathodic Protection

Cathodic protection (CP) merupakan salah satu metode mitigasi korosi yang paling efektif untuk melindungi struktur baja yang beroperasi di lingkungan laut. Berbeda dengan *protective coating* yang bekerja sebagai penghalang fisik, *cathodic protection* mengendalikan korosi melalui modifikasi reaksi elektrokimia pada permukaan logam. Dengan mempertahankan seluruh permukaan struktur sebagai katoda, reaksi oksidasi yang menyebabkan pelarutan logam dapat ditekan sehingga laju korosi menurun secara signifikan. Oleh karena itu, metode ini menjadi bagian penting dalam perlindungan berbagai fasilitas minyak dan gas lepas pantai, seperti *offshore platform, subsea pipeline, jacket structure,* dan *storage tank* (Guo Z, et al 2021; Erdogan C,et al 2021).

Prinsip dasar *cathodic protection* adalah menggeser potensial elektrokimia logam menuju daerah yang lebih negatif sehingga reaksi korosi pada logam dasar tidak lagi berlangsung secara aktif. Strategi ini dapat diterapkan melalui dua pendekatan utama, yaitu *Sacrificial Anode Cathodic Protection* (SACP) dan *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP). Kedua metode tersebut memiliki tujuan yang sama, tetapi berbeda dalam mekanisme kerja, kebutuhan operasional, serta karakteristik aplikasinya sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan ukuran struktur, kondisi operasi, dan umur desain fasilitas (Guo Z, et al 2021).

SACP merupakan sistem yang paling banyak digunakan pada struktur bawah laut karena memiliki konstruksi sederhana dan tidak memerlukan sumber listrik eksternal. Perlindungan diperoleh melalui pemasangan logam yang memiliki potensial elektrokimia lebih negatif, seperti seng, aluminium, atau magnesium, sehingga logam tersebut akan mengalami korosi terlebih dahulu sebagai anoda korban. Sebaliknya, ICCP menggunakan sumber arus searah yang dialirkan melalui anoda inert menuju struktur yang dilindungi sehingga distribusi arus perlindungan dapat diatur secara lebih akurat. Sistem ini lebih sesuai diterapkan pada struktur berukuran besar dengan kebutuhan arus tinggi, meskipun memerlukan biaya investasi dan sistem pengoperasian yang lebih kompleks (Erdogan C,et al 2021; Wiryawan A,et al 2021).

Perkembangan penelitian menunjukkan bahwa desain *cathodic protection* modern tidak lagi hanya berorientasi pada pemilihan jenis anoda, tetapi juga pada optimasi distribusi arus, simulasi medan potensial, prediksi konsumsi anoda, serta evaluasi interaksi antara CP dan *protective coating*. Berbagai pendekatan numerik dan perangkat lunak simulasi kini dimanfaatkan untuk menghasilkan sistem perlindungan yang lebih efisien dari sisi konsumsi energi maupun material (Guo Z, et al 2021; Wiryawan A,et al 2021).

Meskipun memiliki efektivitas yang tinggi, *cathodic protection* tidak dirancang untuk menggantikan fungsi *protective coating*. Tanpa lapisan pelindung, kebutuhan arus perlindungan akan meningkat secara signifikan sehingga konsumsi anoda maupun energi menjadi lebih besar. Sebaliknya, keberadaan *coating* yang baik mampu mengurangi luas permukaan logam yang terpapar sehingga sistem CP bekerja lebih efisien. Oleh karena itu, kombinasi *protective coating* dan *cathodic protection* hingga saat ini masih menjadi standar perlindungan korosi pada sebagian besar struktur minyak dan gas lepas pantai (Liang H et al, 2024; Guo Z, et al 2021).

d. Corrosion Inhibitor

Corrosion inhibitor merupakan salah satu strategi mitigasi korosi yang banyak diterapkan pada sistem produksi minyak dan gas, khususnya pada jaringan perpipaan, *flowline, subsea pipeline*, bejana proses, serta fasilitas yang beroperasi dengan fluida korosif. Berbeda dengan *protective coating* dan *cathodic protection* yang memberikan

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

perlindungan pada permukaan logam dari sisi eksternal, inhibitor bekerja secara kimia dengan mengendalikan reaksi korosi pada antarmuka logam dan media korosif. Karakteristik tersebut menjadikan inhibitor sangat efektif untuk melindungi bagian internal peralatan yang sulit dijangkau oleh metode perlindungan konvensional (Loana D, et al 2025; Aydinsoy E.A, et al 2024).

Efektivitas *corrosion inhibitor* ditentukan oleh kemampuannya menghambat reaksi elektrokimia melalui pembentukan lapisan adsorpsi pada permukaan logam, pembentukan lapisan pasif (*passive film*), maupun penghambatan reaksi anodik dan katodik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa efisiensi inhibitor tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi kimianya, tetapi juga oleh temperatur operasi, pH, salinitas, kecepatan aliran, kandungan gas korosif seperti CO_2 dan H_2S, serta konsentrasi inhibitor di dalam fluida proses. Oleh karena itu, pemilihan inhibitor harus disesuaikan dengan karakteristik sistem operasi yang dilindungi (Loana D, et al 2025).

Berdasarkan mekanisme kerjanya, *corrosion inhibitor* diklasifikasikan menjadi inhibitor anodik, inhibitor katodik, dan inhibitor campuran (*mixed inhibitor*). Inhibitor anodik bekerja dengan mempercepat pembentukan lapisan pasif sehingga reaksi oksidasi logam dapat ditekan, sedangkan inhibitor katodik menghambat reaksi reduksi yang berlangsung pada daerah katoda. Sementara itu, *mixed inhibitor* mampu mengendalikan kedua reaksi tersebut secara bersamaan sehingga umumnya memberikan efisiensi perlindungan yang lebih tinggi. Selain mempertimbangkan efektivitasnya, pemilihan jenis inhibitor juga harus memperhatikan kompatibilitas terhadap fluida proses, stabilitas kimia, serta dampaknya terhadap lingkungan (Loana D, et al 2025; Aydinsoy E.A, et al 2024).

Perkembangan penelitian selama beberapa tahun terakhir menunjukkan adanya pergeseran menuju penggunaan *green corrosion inhibitor*. Pergeseran ini didorong oleh meningkatnya tuntutan industri terhadap teknologi yang lebih ramah lingkungan. Berbagai ekstrak tumbuhan, biomassa, dan limbah pertanian telah diteliti sebagai sumber senyawa aktif yang mampu membentuk lapisan adsorpsi pada permukaan logam. Kandungan alkaloid, flavonoid, tanin, dan polifenol terbukti memiliki kemampuan menghambat proses korosi sekaligus mengurangi penggunaan bahan kimia sintetis yang berpotensi mencemari lingkungan (Aydinsoy E.A, et al 2024; Al-Malah K.A, et al 2024).

Selain *green inhibitor*, perkembangan teknologi juga mengarah pada *smart corrosion inhibitor* yang mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara otomatis. Berbeda dengan inhibitor konvensional yang bekerja secara terus-menerus, *smart inhibitor* dirancang untuk melepaskan senyawa aktif hanya ketika terjadi perubahan pH, peningkatan konsentrasi ion klorida, maupun kerusakan pada lapisan pelindung. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi penggunaan bahan kimia, memperpanjang umur perlindungan, serta mengurangi frekuensi penambahan inhibitor selama operasi sehingga menjadi salah satu arah penelitian yang paling menjanjikan dalam mitigasi korosi modern.

Walaupun menawarkan berbagai keunggulan, penggunaan *corrosion inhibitor* masih menghadapi beberapa tantangan. Efektivitas inhibitor dapat menurun akibat degradasi termal, perubahan komposisi fluida, maupun kondisi hidrodinamika yang berubah selama operasi. Selain itu, penggunaan inhibitor secara berlebihan dapat meningkatkan biaya operasi dan memengaruhi proses produksi. Oleh karena itu, strategi penggunaan inhibitor modern tidak hanya berfokus pada peningkatan efisiensi senyawa kimia, tetapi juga pada optimasi dosis, sistem injeksi, serta pemantauan performa inhibitor secara berkelanjutan (Loana D, et al 2025).

Hasil sintesis berbagai penelitian menunjukkan bahwa *corrosion inhibitor* tetap menjadi komponen penting dalam sistem mitigasi korosi, khususnya untuk melindungi bagian internal fasilitas produksi yang tidak dapat dijangkau oleh *protective coating* maupun *cathodic protection*. Perkembangan menuju *green inhibitor* dan *smart inhibitor* menunjukkan perubahan paradigma menuju sistem perlindungan yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Namun demikian, efektivitasnya akan semakin optimal apabila diterapkan sebagai bagian dari strategi mitigasi yang terintegrasi dengan metode perlindungan lainnya.

e. Material Selection

Pemilihan material (*material selection*) merupakan salah satu strategi paling fundamental dalam mitigasi korosi karena menentukan ketahanan dasar suatu struktur terhadap lingkungan operasi yang agresif. Berbeda dengan *protective coating*, *cathodic protection*, maupun *corrosion inhibitor* yang berfungsi sebagai sistem perlindungan tambahan, pemilihan material dilakukan sejak tahap perancangan sehingga secara langsung memengaruhi keandalan, keselamatan, dan umur layanan fasilitas. Oleh karena itu, pemilihan material tidak hanya mempertimbangkan kekuatan mekanik, tetapi juga ketahanan korosi, karakteristik fluida, kondisi lingkungan, biaya siklus hidup (*life cycle cost*), serta kemudahan inspeksi dan pemeliharaan (Reda A, et al 2025).

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Perkembangan eksplorasi minyak dan gas menuju wilayah laut dalam meningkatkan kebutuhan terhadap material yang memiliki performa tinggi pada kondisi operasi yang semakin ekstrem. Paparan air laut dengan kandungan klorida tinggi, tekanan hidrostatik besar, temperatur yang bervariasi, serta keberadaan gas korosif seperti CO_2 dan H_2S menyebabkan baja karbon konvensional tidak lagi mampu memberikan perlindungan yang memadai pada seluruh aplikasi. Kondisi tersebut mendorong berkembangnya penggunaan *Corrosion-Resistant Alloys* (CRA) sebagai solusi untuk meningkatkan keandalan struktur pada lingkungan yang sangat korosif (Reda A, et al 2025).

CRA merupakan kelompok material yang mampu membentuk lapisan pasif secara spontan pada permukaannya sehingga dapat memperlambat laju degradasi akibat reaksi elektrokimia. Berbagai jenis CRA telah dikembangkan, mulai dari baja tahan karat (*stainless steel*), paduan berbasis nikel (*nickel-based alloy*), hingga paduan titanium. Pemilihan material tersebut sangat bergantung pada kondisi operasi, seperti kandungan klorida, temperatur, tekanan, komposisi fluida, serta potensi terjadinya *stress corrosion cracking* maupun korosi lokal (Reda A, et al 2025).

Di antara berbagai material tahan korosi, *duplex stainless steel* (DSS) menjadi salah satu material yang paling banyak digunakan pada fasilitas offshore karena menawarkan kombinasi antara kekuatan mekanik tinggi dan ketahanan korosi yang sangat baik. Struktur mikro yang terdiri atas fase ferit dan austenit memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap *pitting corrosion*, *crevice corrosion*, serta *chloride stress corrosion cracking* dibandingkan baja tahan karat konvensional. Selain itu, kekuatan mekanik yang lebih tinggi memungkinkan pengurangan ketebalan komponen sehingga memberikan keuntungan dari sisi efisiensi material dan biaya konstruksi (Charles J, 2008; Liu W, et al 2023).

Selain DSS, paduan titanium juga semakin banyak digunakan pada komponen yang beroperasi pada lingkungan laut dengan tingkat korosivitas sangat tinggi. Ketahanan korosi titanium berasal dari terbentuknya lapisan oksida titanium (TiO_2) yang stabil dan mampu melakukan *self-repassivation* ketika mengalami kerusakan. Walaupun biaya investasi awalnya relatif tinggi, penggunaan titanium mampu memperpanjang umur layanan, mengurangi frekuensi perawatan, serta menurunkan risiko kegagalan operasi sehingga memberikan keuntungan ekonomi dalam jangka panjang (Wang L, et al 2024).

Meskipun memiliki ketahanan korosi yang tinggi, material tahan korosi bukan berarti sepenuhnya bebas dari degradasi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa DSS maupun titanium tetap dapat mengalami penurunan performa apabila digunakan di luar kondisi desain atau mengalami kombinasi lingkungan agresif dan pembebanan mekanik. Oleh karena itu, keberhasilan strategi *material selection* tidak hanya bergantung pada jenis material yang dipilih, tetapi juga pada kesesuaiannya dengan kondisi operasi serta integrasinya dengan metode mitigasi lainnya (Wang L, et al 2024; Liu W, et al 2023).

Secara keseluruhan, hasil sintesis menunjukkan bahwa pemilihan material merupakan langkah awal yang menentukan efektivitas seluruh sistem mitigasi korosi. Material dengan ketahanan korosi yang tinggi mampu mengurangi beban kerja *protective coating*, memperpanjang umur *cathodic protection*, serta meningkatkan efektivitas strategi pemeliharaan. Oleh karena itu, *material selection* harus dipandang sebagai bagian dari konsep *Integrated Corrosion Management*, bukan sebagai solusi tunggal dalam pengendalian korosi.

f. Digital Technology

Perkembangan teknologi digital telah mengubah paradigma pengelolaan korosi pada industri minyak dan gas lepas pantai. Selama bertahun-tahun, strategi mitigasi korosi lebih banyak mengandalkan *protective coating*, *cathodic protection*, *corrosion inhibitor*, dan pemilihan material tahan korosi yang dipadukan dengan inspeksi berkala. Meskipun pendekatan tersebut efektif dalam memperlambat degradasi material, sistem pemeliharaan konvensional masih bergantung pada jadwal inspeksi yang telah ditentukan sehingga berpotensi terlambat mendeteksi perubahan kondisi struktur. Kondisi ini mendorong berkembangnya teknologi digital sebagai pelengkap strategi mitigasi korosi konvensional (Imran H.M, et al 2023; Ayyub , et al 2025).

Salah satu perkembangan paling signifikan adalah penerapan *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* dalam analisis korosi. AI mampu mengolah data dari citra inspeksi, sensor korosi, parameter lingkungan, maupun riwayat operasi untuk mengenali pola degradasi yang sulit diidentifikasi secara manual. Berbagai algoritma telah dikembangkan untuk mendeteksi lokasi korosi, mengklasifikasikan tingkat kerusakan, memprediksi laju korosi, hingga memperkirakan *remaining useful life* (RUL) suatu komponen. Kemampuan tersebut memungkinkan proses inspeksi dan pengambilan keputusan dilakukan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi (Imran H.M, et al 2023).

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Selain AI, konsep *Digital Twin* menjadi salah satu inovasi yang paling menjanjikan dalam pengelolaan integritas aset. *Digital Twin* merupakan representasi virtual dari aset fisik yang diperbarui secara terus-menerus menggunakan data aktual dari lapangan. Melalui integrasi data sensor, model numerik, riwayat operasi, serta hasil inspeksi, kondisi struktur dapat dipantau secara *real-time* dan berbagai skenario operasi dapat disimulasikan untuk memprediksi perkembangan korosi maupun mengevaluasi efektivitas strategi mitigasi sebelum diterapkan pada aset fisik (Sun Z, et al 2025; Yan J, et al 2024).

Implementasi *Digital Twin* semakin efektif melalui integrasi dengan *Structural Health Monitoring* (SHM) dan *Internet of Things* (IoT). Sensor yang dipasang pada struktur mampu merekam parameter penting seperti temperatur, kelembapan, ketebalan material, regangan, getaran, serta potensi korosi secara kontinu. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan algoritma AI sehingga perubahan kondisi struktur dapat dideteksi lebih dini. Integrasi ini memungkinkan proses inspeksi bergeser dari pendekatan periodik menuju pemantauan berkelanjutan (*continuous monitoring*) (Sun Z, et al 2025; Ayyub , et al 2025).

Perkembangan tersebut melahirkan konsep *predictive maintenance*, yaitu strategi pemeliharaan yang didasarkan pada kondisi aktual aset dan hasil prediksi degradasi material. Pendekatan ini memungkinkan kegiatan pemeliharaan dilakukan pada waktu yang paling tepat sehingga biaya inspeksi, penghentian operasi, dan risiko kegagalan dapat ditekan secara signifikan. Bagi industri minyak dan gas lepas pantai yang memiliki biaya operasi tinggi, pendekatan ini memberikan keuntungan ekonomi sekaligus meningkatkan keandalan sistem (Ayyub , et al 2025; Jamaludin S, et al 2024).

Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, implementasi teknologi digital di lingkungan offshore masih menghadapi berbagai tantangan, seperti keandalan sensor pada lingkungan laut, kebutuhan infrastruktur komunikasi yang stabil, keamanan siber (*cybersecurity*), interoperabilitas antarperangkat, serta tingginya investasi awal. Selain itu, keberhasilan AI dan *Digital Twin* sangat bergantung pada ketersediaan data berkualitas tinggi dan proses validasi model yang berkelanjutan. Oleh karena itu, transformasi digital dalam mitigasi korosi memerlukan kesiapan teknologi, organisasi, serta sumber daya manusia agar dapat diimplementasikan secara optimal (Imran H.M, et al 2023; Yan J, et al 2024).

Hasil sintesis menunjukkan bahwa teknologi digital tidak dimaksudkan untuk menggantikan metode mitigasi konvensional, melainkan meningkatkan efektivitasnya melalui kemampuan pemantauan, analisis, dan prediksi yang lebih akurat. Integrasi AI, *Digital Twin*, SHM, IoT, dan *predictive maintenance* memungkinkan sistem perlindungan berkembang dari pendekatan reaktif menjadi sistem pengelolaan korosi yang prediktif, adaptif, dan berbasis data. Pendekatan inilah yang menjadi landasan menuju konsep **Integrated Smart Corrosion Management** pada industri minyak dan gas lepas pantai.

g. Comparative Analysis

Perkembangan strategi mitigasi korosi selama dua dekade terakhir menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode yang mampu memberikan perlindungan secara optimal terhadap seluruh mekanisme degradasi pada struktur minyak dan gas lepas pantai. Kompleksitas lingkungan operasi, variasi mekanisme korosi, karakteristik material, serta tuntutan keandalan aset menyebabkan setiap strategi mitigasi memiliki mekanisme kerja, ruang aplikasi, keunggulan, dan keterbatasan yang berbeda. Oleh karena itu, efektivitas pengendalian korosi tidak lagi ditentukan oleh performa satu teknologi, tetapi oleh kemampuan mengombinasikan berbagai metode secara terpadu sesuai kondisi operasi dan target umur layanan struktur.

Di antara berbagai strategi yang telah dikembangkan, *protective coating* masih menjadi metode yang paling luas diterapkan karena berfungsi sebagai penghalang utama antara permukaan logam dan lingkungan korosif. Keunggulan metode ini terletak pada biaya implementasi yang relatif rendah, fleksibilitas aplikasi, serta kemudahan integrasi dengan metode perlindungan lainnya. Namun demikian, performa *coating* sangat dipengaruhi oleh kualitas *surface preparation*, metode aplikasi, serta degradasi lapisan akibat paparan lingkungan dalam jangka panjang. Kerusakan lokal seperti retak, goresan, dan delaminasi dapat menjadi titik awal berkembangnya *underfilm corrosion*, sehingga *protective coating* tidak dapat diandalkan sebagai satu-satunya sistem perlindungan.

Berbeda dengan *protective coating*, *cathodic protection* memberikan perlindungan melalui pengendalian reaksi elektrokimia pada permukaan logam. Keunggulan utamanya adalah kemampuan mempertahankan perlindungan meskipun terjadi kerusakan lokal pada lapisan *coating*. Akan tetapi, efektivitas *cathodic protection* sangat bergantung pada kualitas desain sistem, distribusi potensial listrik, konsumsi anoda, serta kondisi lingkungan laut. Selain itu, penerapan *cathodic protection* tanpa didukung *coating* akan meningkatkan kebutuhan arus maupun konsumsi anoda sehingga efisiensi sistem menjadi lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara *coating* dan *cathodic protection* bersifat saling melengkapi, bukan saling menggantikan.

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Sementara itu, *corrosion inhibitor* memberikan pendekatan yang berbeda karena bekerja langsung pada media korosif melalui mekanisme kimia. Strategi ini memberikan perlindungan yang efektif pada sistem internal, seperti perpipaan, *flowline*, dan bejana proses yang tidak dapat dilindungi menggunakan *coating* maupun *cathodic protection*. Namun demikian, efektivitas inhibitor dipengaruhi oleh temperatur, pH, komposisi fluida, laju aliran, serta stabilitas senyawa kimia selama operasi. Oleh karena itu, penelitian terkini lebih banyak diarahkan pada pengembangan *green corrosion inhibitor* dan *smart corrosion inhibitor* yang memiliki efisiensi tinggi sekaligus lebih ramah lingkungan.

Pendekatan melalui *material selection* berfokus pada peningkatan ketahanan intrinsik material terhadap lingkungan korosif. Penggunaan *corrosion-resistant alloys*, *duplex stainless steel*, dan paduan titanium terbukti mampu memperpanjang umur layanan struktur sekaligus mengurangi kebutuhan pemeliharaan pada aplikasi tertentu. Meskipun demikian, biaya investasi awal yang relatif tinggi menyebabkan penggunaannya lebih banyak difokuskan pada komponen-komponen kritis yang memiliki konsekuensi kegagalan besar. Oleh sebab itu, pemilihan material harus mempertimbangkan keseimbangan antara performa teknis, risiko korosi, serta *life cycle cost*.

Perkembangan teknologi digital kemudian menghadirkan paradigma baru dalam pengelolaan korosi. Berbeda dengan metode konvensional yang berorientasi pada perlindungan material, penerapan *Artificial Intelligence*, *Digital Twin*, *Structural Health Monitoring*, *Internet of Things*, dan *predictive maintenance* lebih difokuskan pada peningkatan kemampuan sistem dalam mendeteksi, memprediksi, dan mengelola degradasi material secara berkelanjutan. Dengan demikian, teknologi digital tidak menggantikan metode mitigasi yang telah ada, melainkan meningkatkan efektivitasnya melalui pemanfaatan data, analisis prediktif, dan pengambilan keputusan yang lebih akurat.

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian, perkembangan strategi mitigasi korosi menunjukkan adanya perubahan paradigma yang cukup jelas selama dua dekade terakhir. Pada tahap awal, penelitian lebih banyak berfokus pada peningkatan performa masing-masing metode perlindungan secara individual. Namun, perkembangan berikutnya mengarah pada pendekatan yang lebih terintegrasi, di mana *protective coating*, *cathodic protection*, *corrosion inhibitor*, *material selection*, dan teknologi digital dipandang sebagai komponen yang saling melengkapi dalam satu sistem pengelolaan korosi. Pergeseran paradigma inilah yang menjadi salah satu temuan utama dalam kajian literatur ini.

Sebagai ringkasan hasil analisis, karakteristik masing-masing strategi mitigasi dapat disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan karakteristik berbagai strategi mitigasi korosi pada struktur minyak dan gas lepas pantai

Strategi	**Mekanisme utama**	**Keunggulan**	**Keterbatasan**	**Aplikasi utama**
Protective Coating	Barrier protection	Biaya relatif rendah, mudah diaplikasikan	Rentan retak dan delaminasi	Seluruh permukaan struktur
Cathodic Protection	Perlindungan elektrokimia	Efektif untuk struktur bawah laut	Membutuhkan desain dan pemeliharaan yang tepat	Jacket, pipeline, struktur bawah laut
Corrosion Inhibitor	Penghambatan reaksi kimia	Efektif melindungi sistem internal	Dipengaruhi kondisi fluida	Flowline, vessel, pipeline
Material Selection	Ketahanan intrinsik material	Umur layanan panjang	Investasi awal tinggi	Komponen kritis
Teknologi Digital	Monitoring dan analisis prediktif	Pemeliharaan berbasis kondisi	Membutuhkan sensor, data, dan infrastruktur digital	Seluruh sistem aset

Hasil analisis komparatif tersebut menunjukkan bahwa setiap strategi memiliki fungsi yang berbeda namun saling melengkapi. Oleh karena itu, pendekatan mitigasi korosi yang paling efektif bukanlah memilih satu metode terbaik, melainkan mengintegrasikan seluruh strategi sesuai karakteristik struktur, lingkungan operasi, dan target umur layanan.

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

h. Future Challenges

Perkembangan teknologi mitigasi korosi selama dua dekade terakhir menunjukkan bahwa penelitian tidak lagi hanya berorientasi pada peningkatan performa masing-masing metode perlindungan, tetapi mulai bergerak menuju pengembangan sistem yang lebih cerdas, adaptif, dan berkelanjutan. Pergeseran tersebut dipengaruhi oleh meningkatnya kompleksitas operasi minyak dan gas lepas pantai, kebutuhan memperpanjang umur layanan aset, serta tuntutan efisiensi biaya pemeliharaan. Akibatnya, fokus penelitian saat ini tidak hanya diarahkan pada peningkatan ketahanan material terhadap korosi, tetapi juga pada pengembangan sistem yang mampu mendeteksi, memprediksi, dan mengendalikan degradasi material secara berkelanjutan (F001–F004).

Salah satu arah penelitian yang berkembang pesat adalah pengembangan *smart coating* yang mampu memberikan perlindungan aktif terhadap kerusakan lapisan. Berbeda dengan pelapis konvensional, *smart coating* memanfaatkan mikrokapsul maupun *nanocontainer* yang berisi senyawa inhibitor sehingga mampu melakukan mekanisme *self-healing* ketika terjadi retak atau kerusakan pada lapisan pelindung. Selain itu, pengembangan *green corrosion inhibitor* berbasis biomaterial juga semakin mendapat perhatian karena menawarkan perlindungan yang efektif dengan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan inhibitor sintetis.

Di bidang digital, integrasi *Artificial Intelligence*, *Machine Learning*, *Digital Twin*, *Internet of Things*, dan *Structural Health Monitoring* diperkirakan akan menjadi faktor utama yang menentukan arah perkembangan mitigasi korosi pada masa depan. Kombinasi teknologi tersebut memungkinkan terbentuknya sistem pemantauan yang mampu mengolah data secara *real-time*, memprediksi perkembangan korosi, serta memberikan rekomendasi tindakan pemeliharaan secara otomatis. Perkembangan ini membuka peluang menuju penerapan *autonomous corrosion management* dengan tingkat intervensi manusia yang semakin minimal.

Meskipun demikian, implementasi teknologi modern masih menghadapi berbagai tantangan, seperti kebutuhan data berkualitas tinggi, interoperabilitas antarplatform digital, keamanan siber, investasi awal yang tinggi, serta keterbatasan sumber daya manusia yang memiliki kompetensi multidisiplin. Oleh karena itu, kolaborasi antara akademisi, industri, lembaga penelitian, dan regulator menjadi faktor penting dalam mempercepat adopsi teknologi mitigasi korosi generasi berikutnya.

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian, arah perkembangan mitigasi korosi diperkirakan akan bergerak menuju sistem yang mampu mengintegrasikan perlindungan material, pemantauan kondisi secara *real-time*, analisis prediktif, dan pengambilan keputusan berbasis data. Pendekatan tersebut menjadi dasar bagi pengembangan konsep **Integrated Smart Corrosion Management** yang dibahas pada bagian berikutnya.

i. Integrated Smart Corrosion Management

Hasil sintesis terhadap berbagai penelitian menunjukkan bahwa perkembangan strategi mitigasi korosi pada industri minyak dan gas lepas pantai mengalami perubahan paradigma yang cukup signifikan selama periode 2006–2026. Pada tahap awal, penelitian lebih banyak difokuskan pada peningkatan efektivitas masing-masing metode perlindungan, seperti *protective coating*, *cathodic protection*, *corrosion inhibitor*, dan material tahan korosi. Seiring meningkatnya kompleksitas lingkungan operasi dan tuntutan keandalan aset, pendekatan tersebut berkembang menuju sistem yang mengintegrasikan berbagai metode dalam satu kerangka pengelolaan korosi yang lebih komprehensif.

Dalam konsep **Integrated Smart Corrosion Management**, setiap strategi memiliki fungsi yang saling melengkapi. *Protective coating* berperan sebagai penghalang utama terhadap lingkungan korosif, *cathodic protection* mempertahankan kestabilan elektrokimia struktur, *corrosion inhibitor* melindungi sistem internal, sedangkan *material selection* meningkatkan ketahanan dasar material terhadap degradasi. Di atas lapisan perlindungan tersebut, teknologi digital seperti AI, *Digital Twin*, SHM, dan IoT berfungsi sebagai sistem pemantauan dan analisis yang memungkinkan pengambilan keputusan dilakukan berdasarkan kondisi aktual aset.

Melalui integrasi tersebut, pengelolaan korosi tidak lagi hanya berfokus pada pencegahan kerusakan material, tetapi berkembang menjadi sistem manajemen integritas aset yang mampu memprediksi risiko, mengoptimalkan strategi pemeliharaan, serta meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan. Dengan demikian, konsep **Integrated Smart Corrosion Management** yang diusulkan dalam artikel ini merupakan hasil sintesis perkembangan berbagai strategi mitigasi korosi selama dua dekade terakhir dan diharapkan dapat menjadi kerangka konseptual bagi penelitian maupun implementasi di industri minyak dan gas lepas pantai.

4. Kesimpulan

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa strategi mitigasi korosi pada struktur minyak dan gas lepas pantai telah

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

mengalami perkembangan yang signifikan selama periode 2006–2026. Kompleksitas lingkungan laut menyebabkan struktur offshore mengalami berbagai mekanisme korosi, seperti *uniform corrosion*, *pitting corrosion*, *crevice corrosion*, *galvanic corrosion*, *erosion-corrosion*, *corrosion fatigue*, hingga *microbiologically influenced corrosion* (MIC). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode perlindungan yang mampu mengatasi seluruh bentuk degradasi material secara efektif, sehingga diperlukan penerapan berbagai strategi mitigasi yang saling melengkapi. Perkembangan teknologi menunjukkan bahwa *protective coating*, *cathodic protection*, *corrosion inhibitor*, dan *material selection* masih menjadi komponen utama dalam sistem perlindungan korosi. Masing-masing metode memiliki mekanisme kerja, keunggulan, serta keterbatasan yang berbeda sehingga penerapannya harus disesuaikan dengan karakteristik struktur, kondisi lingkungan, dan target umur layanan aset. Di sisi lain, transformasi digital melalui pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI), *Digital Twin*, *Structural Health Monitoring* (SHM), *Internet of Things* (IoT), dan *predictive maintenance* telah mengubah paradigma pengelolaan korosi dari pendekatan berbasis jadwal pemeliharaan menuju sistem pemantauan dan pengambilan keputusan berbasis data. Hasil sintesis berbagai penelitian menunjukkan bahwa arah perkembangan mitigasi korosi tidak lagi berfokus pada peningkatan performa masing-masing teknologi secara individual, tetapi bergerak menuju integrasi berbagai metode dalam satu sistem pengelolaan korosi yang komprehensif. Berdasarkan hasil kajian tersebut, artikel ini mengusulkan konsep **Integrated Smart Corrosion Management** sebagai kerangka konseptual yang mengintegrasikan perlindungan material, perlindungan elektrokimia, pengendalian kimia, pemilihan material, pemantauan kondisi secara *real-time*, serta analisis prediktif dalam satu sistem yang saling terhubung. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan keandalan struktur, memperpanjang umur layanan aset, mengoptimalkan biaya pemeliharaan, serta mendukung keberlanjutan operasi pada industri minyak dan gas lepas pantai. Selain memberikan sintesis perkembangan teknologi selama dua dekade terakhir, kajian ini juga menunjukkan bahwa penelitian di masa mendatang perlu lebih difokuskan pada integrasi teknologi digital dengan metode mitigasi konvensional, pengembangan *smart coating* dan *green corrosion inhibitor*, serta peningkatan keandalan sistem berbasis AI dan *Digital Twin*. Dengan demikian, strategi mitigasi korosi pada masa depan tidak hanya bertujuan mengurangi laju degradasi material, tetapi juga mendukung sistem pengelolaan integritas aset yang adaptif, prediktif, dan berkelanjutan.

Referensi

1. Ahmed, M. A., Amin, S., & Mohamed, A. A. (2024). Current and emerging trends of inorganic, organic and eco-friendly corrosion inhibitors. RSC Advances, 14(43), 31877–31920.
2. Bogatu, N., Buruiana, D. L., Muresan, A. C., Ghisman, V., Lupu, A., Mardare, L., Herbei, E. E., Basliu, V., Ceoromila, A., & Florescu, S. (2025). Assessment of the effectiveness of protective coatings in preventing steel corrosion in the marine environment. Polymers, 17(3), 378.
3. Dinu, M. M., Constantinescu-Aruxandei, D., Ion, R.-E., Antoniac, I., & Niculescu, A.-I. (2025). Critical review regarding the application of plant extracts as green corrosion inhibitors. Materials, 18(5), 988.
4. Erdogan, C., & Swain, G. (2021). Conceptual sacrificial anode cathodic protection design for offshore wind monopiles. Ocean Engineering, 235, 109339.
5. Guo, Z., Xiao, Z., Chen, H., Zhou, X., Wang, P., Luo, J., Gao, Y., & Shang, H. (2024). Review of cathodic protection technology for steel rebars in concrete structures in marine environments. Applied Sciences, 14(19), 9062.
6. Hao, J., Yang, K., Wu, J., Wu, M., & Li, Y. (2025). Overview of recent developments in composite epoxy resin in organic coating on steel (2020–2024). Materials, 18(7), 1531.
7. Kassinis, C., Aresti, L., Koronides, M., Christodoulides, P., Michailides, C., & Onoufriou, T. (2025). A review on the environment's influence on coastal marine steel corrosion and in-situ monitoring. Journal of Materials Science: Materials in Engineering, 20, 125.
8. Li, D., Zhang, Z., Sukhbat, B., Wang, X., Zhang, X., Yan, J., Zhang, J., Zhang, Q., Li, Y., Wang, H., & Yan, Y. (2025). Smart inhibitor systems towards anti-corrosion: Design and applications. RSC Applied Polymers, 3(3), 532–548.
9. Liang, H., Shi, X., & Li, Y. (2024). Technologies in marine antifouling and anti-corrosion coatings: A comprehensive review. Coatings, 14(12), 1487.
10. Liu, P., Zhang, H., Fan, Y., & Xu, D. (2023). Microbially influenced corrosion of steel in marine environments: A review from mechanisms to prevention. Microorganisms, 11(9), 2299.
11. Melchers, R. E., Jeffrey, R., Chaves, I. A., & Petersen, R. B. (2025). Predicting corrosion for life estimation of ocean and coastal steel infrastructure. Materials and Corrosion, 76(6), 776–789.
12. Pistone, A., Scolaro, C., & Visco, A. (2021). Mechanical properties of protective coatings against marine fouling: A review. Polymers, 13(2), 173.
13. Răuță, D.-I., Matei, E., & Avramescu, S.-M. (2025). Recent development of corrosion inhibitors: Types, mechanisms, electrochemical behavior, efficiency, and environmental impact. Technologies, 13(3), 103.
14. Shittu, A. A., Mehmanparast, A., Shafiee, M., Kolios, A., Hart, P., & Pilario, K. (2020). Structural reliability assessment of offshore wind turbine support structures subjected to pitting corrosion-fatigue: A damage tolerance modelling approach. Wind Energy, 23(11), 2004–2026.
15. Tian, Y., Bi, Z., & Cui, G. (2021). Study on the corrosion resistance of graphene oxide-based epoxy zinc-rich coatings. Polymers, 13(10), 1657.
16. Wiryawan, A., & Iswanto, P. T. (2021). Design of impressed current cathodic protection of offshore platform in East Borneo Sea. AIP Conference Proceedings, 2338, 040015.
17. Xia, R., Jia, C., & Garbatov, Y. (2025). Deterioration of marine offshore structures and subsea installations subjected to severely corrosive environment: A review. Materials and Corrosion, 76(6), 758–775.

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

18. Zhang, W., Xia, W., Chen, Z., Zhang, G., Qian, S., & Lin, Z. (2024). Comparison of the cathodic protection of epoxy resin coating/zinc-rich coatings on defective areas under atmospheric and immersion conditions: The secondary activation of zinc particles. Coatings, 14(3), 336.

DOI: https://doi.org/10.31004/riggs.v5i2.12400
Lisensi: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)