

Analysis of Corrosion Causes in Metal Components and Prevention Strategies: A Case Study at PT Arqom Technology Innovation

Andrian Riyadi^{1*}, Heru Tri Atmaja², Indra Nur Cahya³

^{1,2}Departemen Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta
Jl. Affandi (Selokan Mataram), Karangmalang, Caturtunggal, Depok, Sleman, DIY, Indonesia

³PT. Arqom Technology Innovation
Jl. Imogiri Barat 90, Wojo, Bangunharjo, Sewon, Bantul, DIY, Indonesia

*Corresponding author: andrianriyadi@uny.ac.id

Abstract

Corrosion is one of the most significant material degradation problems affecting the reliability and service life of metal components in the manufacturing industry. PT Arqom Technology Innovation has experienced corrosion problems in post-fabrication metal components, which are associated with environmental conditions and manufacturing processes. This study aimed to analyze the dominant factors contributing to corrosion, identify the indications of corrosion types based on visual characteristics, and evaluate the effectiveness of the existing corrosion prevention strategies through a case study at PT Arqom Technology Innovation. The research employed a descriptive analytical approach based on field observations, visual inspection of metal components, interviews, and the review of technical documents and relevant literature. The classification of corrosion types was carried out based on visual characteristics, including the morphology, distribution pattern, and location of corrosion, with reference to established corrosion literature. The results indicate that high relative humidity and welding processes are the dominant factors associated with material degradation, while visual inspection indicated the predominance of localized pitting corrosion and localized galvanic corrosion in welded joints and the Heat Affected Zone (HAZ). The existing surface protection strategy was found to be insufficient to withstand the corrosive environmental conditions. These findings highlight the need to improve post-fabrication processes, implement appropriate protective coating systems, and strengthen preventive maintenance practices to achieve more effective and sustainable corrosion control.

Keywords: Corrosion, Heat Affected Zone, Low carbon steel, Corrosion prevention

Abstrak

Korosi merupakan permasalahan degradasi material yang berdampak signifikan terhadap keandalan dan umur pakai komponen logam dalam industri manufaktur. PT Arqom Technology Innovation menghadapi permasalahan korosi pada komponen pasca-fabrikasi yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan kerja dan proses produksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor dominan penyebab korosi, mengidentifikasi indikasi jenis korosi berdasarkan karakteristik visual, serta mengevaluasi efektivitas strategi pencegahan yang diterapkan melalui studi kasus di PT Arqom Technology Innovation. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif analitis berbasis observasi lapangan, inspeksi visual komponen, wawancara, dan penelaahan dokumen teknis serta literatur pendukung. Klasifikasi jenis korosi dilakukan berdasarkan karakteristik visual berupa bentuk kerusakan, pola penyebaran, dan lokasi korosi dengan mengacu pada literatur korosi yang relevan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelembapan relatif lingkungan yang tinggi dan proses pengelasan merupakan faktor dominan yang berkaitan dengan degradasi material, sedangkan hasil inspeksi visual mengindikasikan dominasi korosi lokal tipe *pitting* dan korosi galvanik pada area sambungan las serta *Heat Affected Zone* (HAZ). Strategi perlindungan permukaan

yang ada dinilai belum optimal terhadap tingkat agresivitas lingkungan kerja. Penelitian ini menegaskan perlunya peningkatan kualitas proses pasca-fabrikasi, pemilihan sistem pelapisan yang sesuai, serta penerapan pemeliharaan preventif untuk mengendalikan laju korosi secara berkelanjutan.

Kata kunci: Baja karbon rendah, *Heat Affected Zone*, Korosi, Pencegahan korosi

1. Pendahuluan

Korosi atau karat merupakan isu degradasi material yang paling signifikan dan mendesak dalam industri manufaktur global (Klenam et al., 2021), terutama pada sektor yang mengandalkan komponen logam untuk integritas struktural dan fungsionalitas produk (Bender et al., 2022). Degradasi material tersebut terjadi melalui proses elektrokimia yang secara bertahap merusak struktur material (Bodner et al., 2018). Proses ini menyebabkan penurunan sifat mekanik dan memperpendek umur pakai komponen (Saji, 2023). Dampak lanjutan dari kondisi tersebut adalah meningkatnya biaya perawatan, bertambahnya waktu henti (*downtime*) produksi, serta meningkatnya risiko terjadinya kegagalan sistem yang serius (Ali et al., 2024). PT Arqom Technology Innovation, sebagai perusahaan manufaktur yang berfokus pada rekayasa dan fabrikasi komponen logam, menghadapi tantangan korosi yang diperparah oleh berbagai faktor spesifik, mulai dari karakteristik material yang digunakan, prosedur proses produksi seperti pengelasan, hingga lingkungan operasional yang cenderung lembap dan terpapar kontaminan atmosferik. Oleh karena itu, investigasi komprehensif terhadap akar penyebab korosi di lingkungan operasional perusahaan ini menjadi sangat penting untuk merumuskan solusi rekayasa yang efektif dan berkelanjutan.

Berdasarkan studi literatur yang relevan, menurut (Ivošević et al., 2020), kerentanan korosi pada komponen logam sangat dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu material, lingkungan, dan proses. Secara material, penggunaan baja karbon rendah yang seringkali menjadi pilihan industri menunjukkan kerentanan tinggi

terhadap korosi seragam maupun korosi lokal, terutama di lingkungan yang mengandung ion klorida atau kelembapan tinggi (Angst, 2018). Dari aspek proses, operasi pengelasan telah terbukti menciptakan zona yang rentan terhadap korosi karena perubahan mikrostruktur pada *Heat Affected Zone* (HAZ) sering kali memicu korosi galvanik lokal atau korosi celah (Aljohani et al., 2023). Lebih lanjut, studi yang dilakukan oleh (Fan et al., 2021) telah mengkonfirmasi bahwa lingkungan tropis dengan kandungan kelembaban dan klorida yang tinggi mempercepat laju korosi secara signifikan. Beberapa penemuan ini menegaskan bahwa strategi pencegahan korosi harus mencakup pemilihan coating yang tepat, seperti mengacu pada standar ISO 12944 dan modifikasi proses produksi, untuk meminimalkan cacat yang potensial menjadi titik awal korosi (Drozda & Miszczyk, 2022). Meskipun demikian, penelitian-penelitian terdahulu umumnya mengkaji pengaruh faktor material, lingkungan, atau proses secara terpisah, sehingga belum memberikan gambaran yang komprehensif mengenai interaksi ketiga faktor tersebut pada kondisi operasional nyata di industri manufaktur. Selain itu, kajian yang secara khusus mengevaluasi hubungan antara karakteristik proses fabrikasi, kondisi lingkungan kerja, dan efektivitas strategi pencegahan korosi pada perusahaan manufaktur skala industri di Indonesia masih relatif terbatas. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut melalui analisis terpadu terhadap faktor penyebab korosi pada komponen logam di PT Arqom Technology Innovation serta penyusunan rekomendasi strategi pencegahan yang sesuai dengan kondisi operasional perusahaan.

Berdasarkan hasil observasi awal pada lokasi penelitian di PT Arqom Technology Innovation, masih ditemukan indikasi korosi pada beberapa komponen logam pasca-fabrikasi dengan karakteristik yang bervariasi. Ringkasan hasil observasi awal tersebut disajikan pada Tabel 1, yang menunjukkan bahwa berdasarkan karakteristik visual permukaan, teridentifikasi indikasi beberapa bentuk korosi, seperti korosi seragam, *pitting*, korosi galvanik, dan *flash rust*. Identifikasi pada tahap observasi awal ini masih bersifat indikatif dan digunakan sebagai dasar untuk menentukan fokus penelitian, sedangkan klasifikasi lebih lanjut dilakukan melalui inspeksi visual secara sistematis dengan mengacu pada karakteristik morfologi dan lokasi kerusakan sebagaimana dijelaskan pada metode penelitian. Temuan awal tersebut mengindikasikan bahwa korosi masih menjadi permasalahan yang perlu mendapat perhatian dalam proses fabrikasi karena berpotensi menurunkan kualitas permukaan komponen dan mempercepat degradasi material. Kondisi tersebut juga menunjukkan perlunya investigasi yang lebih mendalam mengenai faktor-faktor penyebab korosi serta evaluasi terhadap strategi pencegahan yang diterapkan di lingkungan perusahaan.

Tabel 1. Ringkasan Temuan Awal Observasi Korosi

Aspek Observasi	Temuan Awal
Komponen yang terindikasi mengalami korosi	Rangka duduk, <i>bracket</i> sambungan, duduk mesin, panel penutup, dan peralatan kerja
Karakteristik korosi yang diamati	Korosi seragam, <i>pitting</i> , korosi galvanik, dan <i>flash rust</i>
Indikasi penyebab awal	Kelembapan lingkungan, residu proses pengelasan, penyimpanan material yang kurang baik, serta perlindungan permukaan yang belum optimal

Permasalahan utama yang dihadapi dalam penelitian ini berkaitan dengan belum tersedianya analisis yang terperinci dan terukur mengenai interaksi antara kelembaban lingkungan, residu kimia dari proses fabrikasi, serta sisa tegangan pada zona las yang berperan sebagai pemicu utama terjadinya korosi. Selain itu, diperlukan identifikasi yang lebih komprehensif terhadap karakteristik dan pola korosi yang berkembang berdasarkan hasil inspeksi visual secara sistematis, baik berupa korosi seragam, korosi lokal tipe *pitting*, maupun korosi galvanik, guna memperoleh pemahaman yang lebih baik mengenai mekanisme degradasi material pada kondisi operasional perusahaan. Permasalahan lainnya adalah belum dievaluasinya secara komprehensif efektivitas strategi perlindungan permukaan yang saat ini diterapkan, seperti pengecatan atau pelapisan, khususnya dalam jangka panjang, sehingga diperlukan perumusan rekomendasi rekayasa pencegahan korosi yang lebih optimal dan realistis.

Penelitian ini secara fundamental bertujuan untuk melakukan analisis komprehensif terhadap penyebab korosi pada komponen logam serta merumuskan strategi pencegahan yang efektif melalui studi kasus di PT Arqom Technology Innovation. Secara lebih spesifik, penelitian ini berupaya menganalisis dan mengidentifikasi secara mendalam faktor-faktor dominan, baik dari aspek lingkungan kerja, karakteristik material, maupun prosedur proses produksi, yang dapat memicu laju degradasi material di fasilitas perusahaan. Selanjutnya, penelitian ini juga bertujuan untuk mengklasifikasikan dan mendeskripsikan indikasi jenis korosi berdasarkan karakteristik visual yang ditemukan pada komponen pasca-fabrikasi. Akhirnya, hasil analisis tersebut akan digunakan sebagai dasar untuk merumuskan dan merekomendasikan strategi rekayasa pencegahan korosi yang optimal, aplikatif, dan terukur, mencakup rekomendasi perbaikan perlindungan permukaan (coating) dan modifikasi prosedur

pemeliharaan preventif, demi meningkatkan keandalan, memperpanjang umur pakai, dan menjamin kualitas produk perusahaan secara berkelanjutan.

Kontribusi penelitian ini terletak pada penyajian analisis yang mengintegrasikan faktor material, lingkungan, dan proses fabrikasi dalam mengidentifikasi penyebab korosi pada kondisi operasional nyata di industri manufaktur. Selain menghasilkan klasifikasi indikasi jenis korosi berdasarkan karakteristik visual serta analisis faktor-faktor yang berkaitan dengan mekanisme degradasi material, penelitian ini juga menyusun rekomendasi strategi pencegahan yang disesuaikan dengan kondisi operasional PT Arqom Technology Innovation sehingga diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengendalian korosi pada industri manufaktur dengan karakteristik proses yang serupa.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif analitis dengan fokus pada studi kasus di PT Arqom Technology Innovation untuk menggambarkan kondisi aktual komponen logam dan lingkungan kerjanya secara sistematis. Pendekatan ini memungkinkan analisis keterkaitan antara faktor lingkungan, proses fabrikasi, dan karakteristik material dalam memicu korosi, sehingga mekanisme yang terjadi dapat diinterpretasikan secara rasional sebagai dasar perumusan strategi pencegahan yang efektif dan aplikatif (Mathew & Adu-Gyamfi, 2025).

2.1 Jenis dan Sumber Data

Data primer dalam penelitian ini sepenuhnya bersumber dari hasil kegiatan lapangan yang dilaksanakan di fasilitas produksi dan area penyimpanan PT Arqom Technology Innovation. Data tersebut diperoleh melalui observasi langsung terhadap kondisi lingkungan kerja, meliputi suhu dan kelembapan relatif, serta pengamatan terhadap penanganan material dan proses pasca-fabrikasi, khususnya pada tahapan pengelasan dan pelapisan

permukaan. Selain itu, wawancara terstruktur dengan personel terkait, seperti insinyur material dan petugas *Quality Control* (QC), dilakukan untuk mendukung hasil observasi lapangan, terutama dalam mengungkap riwayat terjadinya korosi dan praktik pencegahan yang telah diterapkan.

Data sekunder dalam penelitian ini diperoleh dari dokumen teknis internal perusahaan yang digunakan selama kegiatan penelitian, termasuk spesifikasi material yang diaplikasikan, *Material Safety Data Sheet* (MSDS), serta catatan kegagalan komponen akibat korosi. Data tersebut kemudian dipadukan dengan hasil kajian literatur dan standar industri yang relevan sebagai acuan analisis dan pembahasan sehingga interpretasi hasil tetap konsisten dengan kondisi aktual di lapangan. Seluruh sumber data tersebut digunakan sesuai dengan kebutuhan masing-masing tujuan penelitian, mulai dari identifikasi faktor penyebab korosi, klasifikasi jenis korosi, hingga perumusan strategi pencegahan korosi. Keterkaitan antara tujuan penelitian dan sumber data yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Keterkaitan Tujuan Penelitian dengan Sumber Data

Sumber Data	Kontribusi terhadap Tujuan Penelitian
Observasi area produksi	Mengidentifikasi faktor lingkungan dan proses fabrikasi penyebab korosi
Observasi area penyimpanan	Mengidentifikasi pengaruh kondisi penyimpanan terhadap terbentuknya korosi
Wawancara QC dan teknis	Memvalidasi penyebab korosi serta mengevaluasi praktik pencegahan yang diterapkan
Dokumen teknis internal perusahaan	Memverifikasi spesifikasi material dan riwayat kegagalan komponen serta mendukung penyusunan rekomendasi pencegahan korosi

2.2 Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi dalam penelitian ini meliputi seluruh komponen logam hasil proses fabrikasi yang diproduksi dan disimpan di PT Arqom Technology Innovation serta berpotensi mengalami korosi akibat pengaruh lingkungan kerja maupun proses pasca-fabrikasi. Sampel penelitian terdiri atas lima komponen logam pasca-fabrikasi yang dipilih menggunakan teknik purposive sampling, yaitu berdasarkan adanya indikasi korosi yang teramati secara visual pada permukaan komponen. Karakteristik umum komponen sampel yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3. Pemilihan sampel dilakukan untuk mewakili variasi kondisi komponen yang terdapat di area produksi dan penyimpanan perusahaan. Seluruh sampel dapat diakses untuk dilakukan observasi, dokumentasi, serta identifikasi karakteristik korosi sehingga mampu memberikan informasi yang representatif dalam menganalisis faktor penyebab korosi dan menyusun rekomendasi strategi pencegahannya.

Tabel 3. Karakteristik Komponen Sampel Penelitian

Komponen	Karakteristik
Rangka dudukan produk	Baja karbon; hasil proses pengelasan dan coating; area produksi
Bracket sambungan	Baja karbon; hasil proses pengelasan; area produksi
Dudukan mesin kecil	Baja karbon; hasil proses pengelasan dan coating; area produksi
Panel penutup	Baja karbon; hasil pembentukan dan coating; area penyimpanan
Peralatan kerja	Baja karbon; digunakan pada lingkungan produksi; menunjukkan indikasi korosi

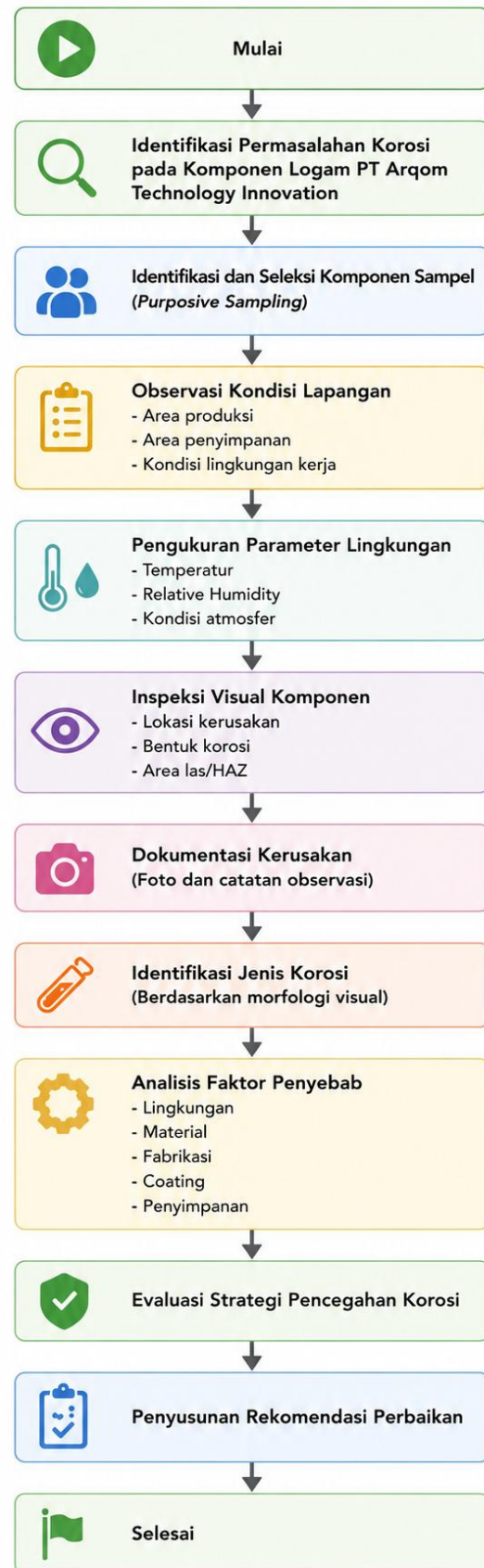
2.3 Instrumen dan Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui tahapan yang bersifat observasional dan analitis dengan mengacu pada pelaksanaan kegiatan lapangan di PT Arqom Technology Innovation. Tahapan pelaksanaan penelitian secara keseluruhan disajikan pada Gambar 1. Tahap awal meliputi survei lapangan untuk mengamati kondisi lingkungan kerja dan proses pasca-fabrikasi yang berpotensi memicu terjadinya korosi. Pada tahap ini dilakukan pengukuran parameter lingkungan berupa temperatur dan kelembapan relatif (*relative humidity*) menggunakan *thermo-hygrometer* digital di area produksi dan area penyimpanan. Selain itu, dilakukan pengamatan terhadap kondisi atmosfer di lingkungan kerja, seperti tingkat keterbukaan area, sirkulasi udara, serta potensi paparan debu maupun uap proses produksi yang diperkirakan dapat memengaruhi laju korosi pada komponen logam. Observasi juga dilakukan terhadap alur proses produksi, khususnya penanganan material, proses pengelasan, serta kondisi pelapisan permukaan (*coating*). Pengamatan tersebut bertujuan untuk memperoleh gambaran kondisi aktual lingkungan kerja dan proses fabrikasi yang berkaitan dengan potensi terjadinya degradasi material serta sebagai dasar dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang berkontribusi terhadap terjadinya korosi.

Tahap selanjutnya adalah inspeksi visual terhadap komponen logam pasca-fabrikasi yang menunjukkan indikasi korosi. Inspeksi dilakukan secara langsung dengan bantuan dokumentasi foto untuk mengidentifikasi bentuk, lokasi, dan karakteristik kerusakan, terutama pada area sambungan las dan zona yang terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*). Dokumentasi foto tidak hanya digunakan sebagai bukti pelaksanaan observasi, tetapi juga sebagai data pendukung dalam analisis visual untuk membandingkan karakteristik korosi antar komponen, memverifikasi hasil pengamatan lapangan, serta membantu proses klasifikasi jenis korosi berdasarkan

morfologi permukaan material. Klasifikasi jenis korosi dilakukan mengacu pada karakteristik visual yang dijelaskan dalam literatur korosi, seperti bentuk kerusakan, pola penyebaran korosi, lokasi terjadinya korosi, serta karakteristik morfologi permukaan yang membedakan korosi seragam, korosi lokal tipe *pitting*, korosi galvanik, dan *flash rust* (Fontana & Greene, 1986). Identifikasi jenis korosi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode inspeksi visual tanpa melibatkan pengujian laboratorium, seperti metalografi, *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS), maupun pengukuran ketebalan pelapisan (*coating thickness measurement*). Oleh karena itu, klasifikasi jenis korosi didasarkan pada karakteristik morfologi permukaan yang teramati secara visual.

Tahap akhir berupa analisis deskriptif terhadap temuan lapangan dengan mengaitkan kondisi lingkungan, karakteristik proses fabrikasi, dan pola kerusakan yang teramati. Analisis ini didukung oleh penelaahan dokumen teknis internal perusahaan, hasil wawancara dengan personel perusahaan, serta referensi literatur yang relevan untuk menginterpretasikan mekanisme korosi yang mungkin terjadi. Dengan pendekatan tersebut, identifikasi faktor penyebab dan perumusan strategi pencegahan korosi dilakukan berdasarkan kondisi nyata di lapangan sehingga menghasilkan rekomendasi yang sesuai dengan kondisi operasional di PT Arqom Technology Innovation.



Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

2.4 Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dari survei lapangan, inspeksi visual komponen, wawancara, serta penelaahan dokumen teknis dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif analitis. Analisis dilakukan secara bertahap, diawali dengan pengelompokan data berdasarkan sumbernya, yaitu hasil observasi, dokumentasi visual, wawancara, dan dokumen teknis perusahaan. Selanjutnya dilakukan identifikasi dan klasifikasi jenis korosi berdasarkan karakteristik visual yang teramati pada setiap komponen, kemudian dianalisis keterkaitannya dengan faktor-faktor yang diduga menjadi penyebab korosi, meliputi kondisi lingkungan kerja, karakteristik material, proses pengelasan, kondisi pelapisan permukaan, serta metode penyimpanan komponen. Hasil analisis dari berbagai sumber data selanjutnya diinterpretasikan secara terpadu dengan membandingkan temuan lapangan, informasi hasil wawancara, dokumen teknis perusahaan, serta kajian literatur yang relevan untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai mekanisme terjadinya korosi.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, perumusan strategi pencegahan korosi dilakukan secara aplikatif dengan mempertimbangkan tingkat agresivitas lingkungan kerja dan karakteristik proses pasca-fabrikasi yang ada. Rekomendasi disusun dengan mengacu pada standar dan praktik yang relevan, khususnya ISO 12944-2 mengenai klasifikasi tingkat korosivitas lingkungan (*classification of environments*) sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan perlindungan permukaan (*coating*), serta diarahkan pada perbaikan sistem pelapisan, prosedur penanganan material, dan pemeliharaan preventif. Pendekatan ini bertujuan menghasilkan strategi pengelolaan korosi yang realistis dan dapat diterapkan sesuai dengan kondisi aktual di PT Arqom Technology Innovation.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil

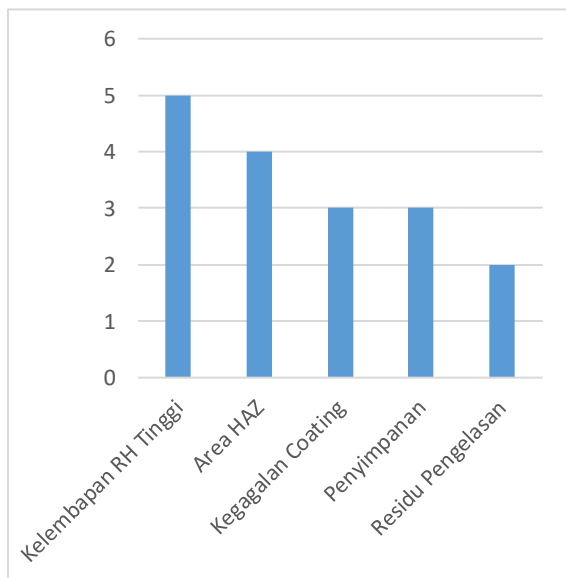
3.1 Identifikasi Faktor Dominan Pemicu Laju Degradasi Material

Berdasarkan hasil observasi lapangan di PT Arqom Technology Innovation, diperoleh temuan bahwa kondisi lingkungan kerja dan proses fabrikasi merupakan faktor dominan yang memengaruhi laju degradasi material pada komponen logam. Identifikasi faktor dominan dilakukan melalui analisis deskriptif terhadap hasil observasi lapangan, dokumentasi visual, wawancara dengan personel *Quality Control* (QC) dan teknisi, serta penelaahan dokumen teknis perusahaan. Suatu faktor dikategorikan sebagai faktor dominan apabila secara konsisten ditemukan pada sebagian besar komponen yang diamati dan menunjukkan keterkaitan yang kuat dengan karakteristik korosi yang teridentifikasi.

Hasil observasi menunjukkan bahwa indikasi korosi lebih banyak ditemukan pada komponen yang berada pada lingkungan dengan kelembapan relatif tinggi ($RH > 78\%$), terutama pada area sambungan las (*weld joint*) dan *Heat Affected Zone* (HAZ). Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa lingkungan kerja yang lembap, dikombinasikan dengan perubahan mikrostruktur akibat proses pengelasan, berperan penting dalam mempercepat terjadinya korosi (Pranata et al., 2025). Selain itu, beberapa komponen juga menunjukkan indikasi kegagalan lapisan pelindung (*coating*) dan masih ditemukannya residu pasca-pengelasan, yang diduga turut mempercepat proses degradasi material.

Secara keseluruhan, hasil identifikasi menunjukkan bahwa laju degradasi material pada komponen logam di PT Arqom Technology Innovation dipengaruhi oleh interaksi antara kondisi lingkungan, karakteristik material, proses fabrikasi, dan kualitas perlindungan permukaan. Faktor-faktor tersebut memiliki kontribusi yang berbeda terhadap

terbentuknya korosi pada komponen hasil fabrikasi. Berdasarkan hasil observasi lapangan, kelembapan relatif yang tinggi, keberadaan area *Heat Affected Zone* (HAZ), dan kondisi pelapisan permukaan (*coating*) merupakan faktor yang paling dominan memengaruhi terjadinya degradasi material, sedangkan residu pengelasan dan kondisi penyimpanan turut memberikan kontribusi terhadap percepatan proses korosi. Ringkasan faktor dominan penyebab korosi yang teridentifikasi selama penelitian disajikan pada Gambar 2. Temuan tersebut menjadi dasar untuk menganalisis mekanisme korosi yang terjadi serta mengevaluasi strategi pencegahan korosi yang sesuai dengan kondisi operasional di PT Arqom Technology Innovation.



Gambar 2. Faktor Dominan Penyebab Korosi pada Komponen Logam

3.1.1 Faktor Lingkungan Kerja

Hasil pengamatan terhadap parameter iklim di area produksi dan penyimpanan menunjukkan bahwa lingkungan kerja berada pada kondisi yang mendukung terjadinya korosi atmosferik. Pengukuran suhu dan kelembapan relatif dilakukan selama periode observasi lapangan pada jam operasional PT Arqom Technology Innovation di area produksi dan penyimpanan. Nilai yang disajikan pada Tabel 3 merupakan rentang hasil pengukuran yang diperoleh selama periode

observasi tersebut. Selama periode observasi, suhu lingkungan berada pada kisaran 29°C hingga 33°C, sedangkan kelembapan relatif berada pada kisaran 78–88%. Kondisi kelembapan yang tinggi ini melampaui batas kelembapan kritis baja karbon rendah yang digunakan sebagai material utama, sehingga memungkinkan terbentuknya lapisan elektrolit tipis pada permukaan logam. Keberadaan lapisan tersebut berperan dalam mempercepat terjadinya reaksi elektrokimia yang memicu inisiasi korosi, khususnya pada komponen yang terpapar langsung lingkungan tanpa perlindungan permukaan yang memadai (Shaker et al., 2023). Ringkasan hasil pengukuran suhu dan kelembapan relatif pada masing-masing lokasi pengamatan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rata-rata Suhu dan Kelembapan Relatif Lingkungan Kerja

Lokasi Pengukuran	Suhu (°C)	Kelembapan Relatif (%)
Area Produksi	29 – 33	78 – 85
Area Penyimpanan	29 – 32	80 – 88

3.1.2 Faktor Proses Produksi

Hasil observasi terhadap proses pasca-fabrikasi menunjukkan bahwa tahapan pengelasan, baik menggunakan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW) maupun Tungsten Inert Gas (TIG), merupakan faktor proses yang berkontribusi signifikan terhadap kerentanan material terhadap korosi. Berdasarkan pengamatan lapangan, area sambungan las dan zona yang terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*) merupakan lokasi yang paling sering menunjukkan indikasi awal degradasi material. Kondisi ini mengindikasikan bahwa perubahan karakteristik material akibat siklus termal selama proses pengelasan berperan dalam menurunkan ketahanan korosi pada area tersebut dibandingkan dengan logam induk di sekitarnya (Benedito et al., 2024).

Selain faktor termal, observasi visual juga menunjukkan adanya residu proses

pengelasan, seperti sisa flux dan spatter, yang pada beberapa komponen tidak dibersihkan secara menyeluruh sebelum proses pelapisan permukaan dilakukan. Keberadaan residu tersebut berpotensi mengganggu adhesi lapisan pelindung dan menciptakan area lokal yang lebih rentan terhadap serangan korosi. Temuan ini memperkuat indikasi bahwa kualitas proses pasca-fabrikasi, khususnya pada tahap pengelasan dan persiapan permukaan, memiliki peran penting dalam memicu terjadinya korosi lokal pada komponen logam (Zakerin et al., 2025).

3.2 Klasifikasi dan Deskripsi Karakteristik Jenis Korosi



Gambar 3. Korosi pada Besi



Gambar 4. Observasi Sampel Karat

Berdasarkan hasil inspeksi visual terhadap komponen logam pasca-fabrikasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4, ditemukan pola kerusakan yang menunjukkan adanya korosi lokal yang dominan. Observasi lapangan terhadap permukaan komponen memperlihatkan bahwa kerusakan tidak terjadi secara merata, melainkan terkonsentrasi pada area tertentu, terutama di sekitar sambungan las dan zona yang terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*). Klasifikasi jenis korosi dilakukan berdasarkan karakteristik visual yang meliputi bentuk kerusakan, pola penyebaran korosi, lokasi terjadinya korosi, serta morfologi permukaan material dengan mengacu pada kriteria identifikasi visual yang dijelaskan dalam literatur korosi (Fontana & Greene, 1986). Berdasarkan karakteristik tersebut, indikasi korosi yang ditemukan diklasifikasikan ke dalam dua jenis utama, yaitu korosi lokal tipe *pitting* dan korosi galvanik lokal.

3.2.1 Korosi Lokal Tipe *Pitting*

Korosi lokal tipe *pitting* teridentifikasi sebagai bentuk kerusakan yang paling dominan dan berpotensi merugikan. Karakteristik korosi ini ditandai

dengan terbentuknya lubang-lubang kecil pada permukaan logam yang berkembang secara lokal dengan kedalaman relatif signifikan. Berdasarkan hasil observasi, pitting paling banyak ditemukan pada area sambungan las dan HAZ, yang secara teoritis merupakan zona dengan heterogenitas mikrostruktur dan tegangan sisa yang lebih tinggi akibat siklus termal pengelasan. Kondisi tersebut, dikombinasikan dengan lingkungan lembab, mempercepat inisiasi korosi lokal sehingga kegagalan material yang terjadi bersifat terlokalisasi dan tidak menunjukkan ciri korosi seragam.

3.2.2 Korosi Galvanik Lokal

Selain korosi pitting, hasil inspeksi juga menunjukkan indikasi terjadinya korosi galvanik lokal pada antarmuka antara logam las (*weld metal*) dan logam induk. Secara teoritis, proses pengelasan dapat menyebabkan perbedaan karakteristik elektrokimia antara kedua zona tersebut, baik akibat variasi komposisi material, struktur mikro, maupun kondisi permukaan (Wang et al., 2025). Perbedaan potensial ini membentuk sel galvanik lokal yang mendorong terjadinya korosi selektif pada zona yang bersifat lebih anodik, yang dalam banyak kasus berada di sekitar HAZ. Temuan ini diperkuat oleh temuan Shravan et al. (2024) yang mengindikasikan bahwa proses pengelasan tidak hanya mempengaruhi kekuatan mekanik sambungan, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan kerentanan korosi pada area kritis komponen.

3.3 Evaluasi Strategi Pencegahan Korosi Eksisting

Berdasarkan hasil observasi lapangan dan karakteristik korosi yang teridentifikasi, dapat disimpulkan bahwa strategi perlindungan permukaan yang saat ini diterapkan pada komponen logam di PT Arqom Technology Innovation belum memberikan tingkat perlindungan yang memadai terhadap kondisi lingkungan kerja yang ada. Evaluasi tersebut dilakukan berdasarkan keterpaduan hasil inspeksi

visual komponen, kondisi lingkungan kerja, informasi hasil wawancara dengan personel *Quality Control* (QC) dan teknisi, serta penelaahan dokumen teknis perusahaan mengenai proses pelapisan dan penanganan komponen pasca-fabrikasi. Dasar evaluasi menunjukkan bahwa indikasi korosi masih ditemukan pada beberapa komponen yang telah melalui proses pelapisan, terutama pada area sambungan las dan selama tahap penyimpanan, sehingga mengindikasikan bahwa sistem perlindungan yang diterapkan belum sepenuhnya mampu menyesuaikan dengan tingkat korosivitas lingkungan kerja. Lingkungan dengan kelembapan relatif yang tinggi ($RH > 78\%$), sebagaimana ditunjukkan pada hasil pengukuran lingkungan, menuntut sistem pelapisan dengan ketahanan yang lebih baik terhadap korosi atmosferik. Kondisi tersebut juga dibandingkan dengan rekomendasi klasifikasi lingkungan korosif menurut ISO 12944-2 sebagai acuan dalam menilai kesesuaian kebutuhan perlindungan permukaan terhadap kondisi lingkungan yang diamati. Temuan di lapangan menunjukkan bahwa indikasi korosi masih muncul pada komponen dalam waktu relatif singkat setelah proses pelapisan, khususnya selama fase penyimpanan pasca-fabrikasi.

Ketidakefektifan strategi pencegahan tersebut terutama berkaitan dengan kualitas persiapan permukaan dan kesesuaian sistem pelapisan yang digunakan. Observasi pada area sambungan las dan zona yang terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*) menunjukkan adanya sisa kontaminan proses, seperti residu pengelasan, yang berpotensi mengganggu daya lekat lapisan pelindung. Selain itu, sistem *coating* yang diterapkan belum sepenuhnya disesuaikan dengan tingkat agresivitas lingkungan korosif yang dihadapi, terutama pada area dengan geometri kompleks dan heterogenitas material seperti HAZ. Kondisi ini sejalan dengan hasil klasifikasi jenis korosi yang didominasi oleh korosi lokal, sehingga memperkuat indikasi bahwa strategi perlindungan permukaan yang ada masih

bersifat suboptimal dan memerlukan perbaikan yang lebih terarah.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, beberapa alternatif strategi pencegahan korosi dapat dipertimbangkan sesuai dengan karakteristik lingkungan dan komponen yang diamati. Penggunaan sistem epoxy coating mampu memberikan perlindungan berupa *barrier protection* yang efektif terhadap penetrasi air dan oksigen, sehingga sesuai untuk lingkungan dengan kelembapan tinggi, namun membutuhkan persiapan permukaan yang baik agar daya lekat lapisan tetap optimal (Elewa et al., 2025). Zinc-rich primer menawarkan perlindungan tambahan melalui mekanisme proteksi katodik sehingga masih mampu melindungi baja ketika lapisan mengalami kerusakan lokal, meskipun biaya material dan proses aplikasinya relatif lebih tinggi (Huang et al., 2024). Metode hot-dip galvanizing memiliki ketahanan korosi jangka panjang, tetapi kurang sesuai untuk komponen hasil fabrikasi dengan dimensi besar, geometri kompleks, maupun sambungan las yang telah selesai dirakit (Liu et al., 2024). Sementara itu, cathodic protection lebih efektif diterapkan pada struktur yang beroperasi di lingkungan dengan tingkat korosivitas sangat tinggi, seperti struktur bawah tanah atau lingkungan laut (Guo et al., 2024). Alternatif lain berupa penggunaan material stainless steel mampu meningkatkan ketahanan korosi secara signifikan, namun memerlukan biaya investasi yang lebih besar sehingga kurang efisien apabila diterapkan pada seluruh komponen fabrikasi (Reda et al., 2025).

Dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan kerja, karakteristik komponen, kemudahan implementasi, serta aspek ekonomis, peningkatan kualitas persiapan permukaan yang dipadukan dengan penggunaan sistem pelapisan berbasis epoxy dan zinc-rich primer pada area kritis merupakan strategi yang paling sesuai untuk diterapkan di PT Arqom Technology Innovation. Strategi tersebut diperkirakan mampu meningkatkan ketahanan korosi

pada area sambungan las dan HAZ tanpa memerlukan perubahan material maupun investasi yang terlalu besar, sehingga lebih realistis untuk diimplementasikan dalam sistem produksi perusahaan.

3.4 Implikasi Ekonomi Implementasi Strategi Pencegahan Korosi

Implementasi strategi pencegahan korosi yang diusulkan tidak hanya memberikan manfaat dari aspek teknis, tetapi juga berpotensi meningkatkan efisiensi ekonomi dalam pengelolaan aset di PT Arqom Technology Innovation. Berdasarkan hasil identifikasi faktor penyebab korosi, kerusakan komponen didominasi oleh pengaruh kelembapan lingkungan yang tinggi, kualitas persiapan permukaan yang kurang optimal, serta kerentanan area sambungan las dan *Heat Affected Zone* (HAZ). Kondisi tersebut menyebabkan komponen memerlukan tindakan perbaikan atau pelapisan ulang dalam waktu yang relatif lebih singkat, sehingga berpotensi meningkatkan biaya pemeliharaan selama masa operasional.

Jose et al. (2025) berpendapat bahwa penerapan strategi berupa peningkatan kualitas persiapan permukaan, penggunaan sistem pelapisan yang sesuai dengan tingkat korosivitas lingkungan, serta pelaksanaan inspeksi dan pemeliharaan preventif secara berkala diperkirakan mampu memperlambat laju degradasi material. Dengan menurunnya laju korosi, frekuensi perbaikan maupun penggantian komponen akibat kerusakan dini dapat dikurangi sehingga biaya pemeliharaan (*maintenance cost*) menjadi lebih efisien. Selain itu, peningkatan ketahanan korosi juga berpotensi memperpanjang umur pakai komponen (*service life*), yang pada akhirnya menurunkan biaya siklus hidup aset (*life cycle cost*) secara keseluruhan.

Penelitian Adewoyin et al. (2023) menunjukkan bahwa dari sisi operasional, berkurangnya kejadian korosi pada area kritis akan meningkatkan keandalan komponen dan mengurangi risiko terjadinya kerusakan yang tidak terencana (*unplanned*

downtime). Kondisi tersebut memberikan dampak positif terhadap kelancaran proses produksi, karena aktivitas perbaikan darurat maupun penghentian operasi akibat kegagalan komponen dapat diminimalkan. Dengan demikian, perusahaan tidak hanya memperoleh manfaat berupa penurunan biaya langsung untuk pemeliharaan dan penggantian komponen, tetapi juga memperoleh manfaat tidak langsung melalui peningkatan produktivitas, efisiensi penggunaan sumber daya, serta kontinuitas proses produksi. Meskipun penelitian ini tidak melakukan analisis biaya secara kuantitatif, hasil evaluasi menunjukkan bahwa penerapan strategi pencegahan korosi yang tepat berpotensi memberikan keuntungan ekonomi jangka panjang.

Pembahasan

3.1 Analisis Mekanisme Korosi Berdasarkan Faktor Dominan

Kondisi lingkungan kerja dengan kelembaban relatif tinggi berperan sebagai faktor utama yang mengendalikan mekanisme inisiasi dan percepatan korosi pada komponen logam. Secara teoritis, kelembaban yang melampaui nilai kritis baja karbon memungkinkan terbentuknya lapisan elektrolit tipis yang stabil di permukaan material, sehingga reaksi elektrokimia dapat berlangsung secara berkelanjutan (Song et al., 2020). Dalam lingkungan tropis dengan suhu relatif hangat, laju reaksi tersebut semakin meningkat akibat percepatan kinetika reaksi korosi atmosferik, sebagaimana dijelaskan dalam klasifikasi agresivitas lingkungan korosif (ISO 9223). Oleh karena itu, degradasi material yang teramati merupakan konsekuensi logis dari interaksi antara kelembaban tinggi dan temperatur lingkungan.

Selain faktor lingkungan, karakteristik material dan proses fabrikasi turut memperkuat mekanisme korosi yang terjadi. Baja karbon rendah secara inheren memiliki ketahanan terbatas terhadap korosi atmosferik apabila tidak dilindungi dengan sistem pelapisan yang memadai (Dong et al.,

2021). Konsentrasi kerusakan pada area sambungan las dan zona yang terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*) mengindikasikan bahwa siklus termal pengelasan berperan sebagai pemicu terbentuknya kondisi elektrokimia lokal. Literatur menyebutkan bahwa HAZ umumnya memiliki heterogenitas struktur dan tegangan sisa yang lebih tinggi, sehingga lebih rentan terhadap inisiasi korosi dibandingkan logam induk (Bai et al., 2018).

3.2 Interpretasi Karakteristik Korosi Kritis

Dominasi korosi lokal, khususnya tipe pitting, mengindikasikan bahwa mekanisme kegagalan material yang berkembang bersifat selektif dan terlokalisasi. Dalam teori korosi, pitting umumnya dipicu oleh ketidaksempurnaan permukaan, heterogenitas mikrostruktur, atau keberadaan kontaminan lokal yang bertindak sebagai titik awal serangan korosi (Pedferri, 2018). Karakteristik ini menjadikan korosi pitting sebagai salah satu bentuk kerusakan paling berbahaya karena mampu menembus ketebalan material secara lokal tanpa kehilangan massa yang signifikan secara keseluruhan, sehingga berpotensi menyebabkan kegagalan prematur pada komponen (Melchers, 2018).

Selain itu, indikasi terjadinya korosi galvanik lokal pada antarmuka antara logam las dan logam induk dapat dipahami sebagai konsekuensi dari perbedaan karakteristik elektrokimia antar zona tersebut. Literatur korosi menyatakan bahwa perbedaan potensial akibat variasi komposisi, struktur mikro, atau kondisi permukaan dapat membentuk sel galvanik lokal, di mana zona dengan energi lebih tinggi akan bertindak sebagai anoda dan mengalami degradasi lebih cepat (Kolesnikov et al., 2020). Dalam konteks ini, HAZ berpotensi menjadi area yang terkuras secara selektif, sehingga memperkuat dominasi kerusakan lokal pada sambungan las.

3.3 Strategi Rekayasa Pencegahan Korosi yang Optimal dan Aplikatif

Berdasarkan interpretasi mekanisme dan karakteristik korosi yang berkembang, strategi pencegahan yang efektif harus diarahkan pada pengendalian faktor inisiasi serta perlindungan area kritis yang paling rentan. Pendekatan rekayasa pencegahan korosi modern menekankan pentingnya kombinasi antara perbaikan proses, pemilihan sistem pelindung yang sesuai, dan pengelolaan lingkungan kerja secara terintegrasi (Aljibori et al., 2023). Dengan demikian, strategi pencegahan tidak hanya berfokus pada pelapisan, tetapi juga pada kualitas proses pasca-fabrikasi dan pemeliharaan preventif.

3.3.1 Peningkatan Kualitas Persiapan Permukaan

Persiapan permukaan merupakan faktor kunci dalam keberhasilan sistem pelapisan terhadap korosi. Literatur dan standar teknis menegaskan bahwa keberadaan oksida, residu pengelasan, dan kontaminan permukaan dapat secara signifikan menurunkan daya lekat lapisan pelindung dan menciptakan titik inisiasi korosi lokal (Chen et al., 2018). Oleh karena itu, peningkatan kualitas persiapan permukaan, khususnya pada area sambungan las dan HAZ, menjadi langkah fundamental untuk meminimalkan risiko korosi pitting. Standarisasi tingkat kebersihan permukaan sebelum pelapisan juga sejalan dengan spesifikasi teknis persiapan permukaan industri (SSPC Standards).

3.3.2 Implementasi Sistem Pelapis Berkinerja Tinggi

Pemilihan sistem pelapis perlu disesuaikan dengan tingkat agresivitas lingkungan kerja yang dihadapi. Mengacu pada standar perlindungan korosi struktur baja, lingkungan dengan paparan kelembaban tinggi memerlukan sistem pelapisan yang mampu memberikan perlindungan jangka panjang terhadap korosi atmosferik (ISO 12944). Secara teoritis, sistem pelapisan berlapis yang mengombinasikan perlindungan katodik,

ketahanan kimia, dan ketahanan terhadap degradasi lingkungan dinilai lebih efektif dalam melindungi baja karbon (Rêgo et al., 2023). Pendekatan ini relevan untuk melindungi area kritis seperti HAZ yang memiliki kerentanan lebih tinggi.

3.3.3 Modifikasi Prosedur Pemeliharaan Preventif

Selain peningkatan kualitas pelapisan, strategi pencegahan korosi perlu didukung oleh penerapan prosedur pemeliharaan preventif yang terstruktur. Literatur *corrosion management* menekankan bahwa inspeksi rutin pada area kritis memungkinkan deteksi dini indikasi korosi sebelum berkembang menjadi kerusakan yang lebih parah (Wright et al., 2019). Di samping itu, pengendalian kondisi penyimpanan komponen pasca-fabrikasi, terutama terkait kelembaban lingkungan, merupakan langkah penting untuk memutus siklus inisiasi korosi (ISO 17301). Pendekatan pemeliharaan preventif ini sejalan dengan prinsip pengelolaan korosi modern yang bertujuan memperpanjang umur pakai komponen secara berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa hasil observasi lapangan, inspeksi visual, wawancara, dan penelaahan dokumen teknis menunjukkan adanya keterkaitan antara degradasi material pada komponen baja karbon rendah di PT Arqom Technology Innovation dengan kondisi lingkungan kerja yang memiliki kelembaban relatif tinggi serta karakteristik proses pasca-fabrikasi, khususnya pengelasan. Hasil analisis menunjukkan bahwa lingkungan dengan tingkat kelembaban relatif yang tinggi dan keberadaan area sambungan las serta zona yang terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*) merupakan kondisi yang secara konsisten ditemukan pada komponen yang mengalami indikasi korosi, sehingga diidentifikasi sebagai faktor dominan yang berkaitan dengan terjadinya degradasi material. Berdasarkan identifikasi visual yang mengacu pada karakteristik morfologi permukaan sesuai dengan literatur korosi,

indikasi korosi yang dominan pada komponen yang diamati diklasifikasikan sebagai korosi lokal tipe *pitting* dan korosi galvanik di sekitar sambungan las. Temuan ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan dan proses fabrikasi berpotensi mempercepat terjadinya degradasi material serta menurunkan keandalan komponen apabila tidak diimbangi dengan sistem perlindungan permukaan dan pemeliharaan yang memadai. Evaluasi terhadap praktik perlindungan permukaan yang ada juga menunjukkan bahwa sistem yang diterapkan masih perlu ditingkatkan agar lebih sesuai dengan tingkat korosivitas lingkungan kerja yang diamati.

Sebagai rekomendasi, penelitian lanjutan disarankan untuk berfokus pada evaluasi kinerja sistem pelapisan yang lebih sesuai dengan tingkat agresivitas lingkungan kerja melalui pengamatan terkontrol dan pemantauan jangka menengah hingga panjang. Selain itu, kajian lebih mendalam mengenai praktik pengelasan dan kualitas persiapan permukaan perlu dilakukan untuk mengidentifikasi langkah perbaikan proses yang dapat mengurangi kerentanan korosi pada area kritis. Upaya lanjutan juga dapat diarahkan pada pengembangan prosedur pemeliharaan preventif dan pengendalian kondisi penyimpanan pasca-fabrikasi, khususnya terkait pengelolaan kelembaban, sebagai bagian dari strategi pengelolaan korosi yang lebih sistematis dan aplikatif.

Referensi

- Adewoyin, M. A., Ogunnowo, E. O., Fiemotongha, J. E., Igunma, T. O., & Adeleke, A. K. (2023). Systematic Review of AI-Augmented Corrosion Modeling Techniques in Infrastructure and Manufacturing Systems. *Journal of Frontiers in Multidisciplinary Research*, 4(1), 362–380. <https://doi.org/10.54660/JFMR.2023.4.1.362-380>
- Ali, A. A. I. M., Imran, M. M. H., Jamaludin, S., Ayob, A. F. M., Suhrah, M. I. R., Norzeli, S. M., Basri, S. B. H., & Mohamed, S. B. (2024). A Review of Predictive Maintenance Approaches for Corrosion Detection and Maintenance of Marine Structures. *JOURNAL OF SUSTAINABILITY SCIENCE AND MANAGEMENT*, 19(4), 180–200. <https://doi.org/10.46754/jssm.2024.04.014>
- Aljibori, H. S., Alamiery, A., & Kadhum, A. A. H. (2023). Advances in corrosion protection coatings: A comprehensive review. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 12(4). <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-6>
- Aljohani, T. A., Alateyah, A. I., El-Sanabary, S., & El-Garaihy, W. H. (2023). Corrosion of Weldments. In *Welding of Metallic Materials* (pp. 565–588). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90552-7.00010-9>
- Angst, U. M. (2018). Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. *Materials and Structures*, 51(1), 4. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6>
- Bai, L., Jiang, K., & Gao, L. (2018). The Influence and Mechanism of Residual Stress on the Corrosion Behavior of Welded Structures. *Materials Research*, 21(5). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2018-01660>
- Bender, R., Féron, D., Mills, D., Ritter, S., Bäßler, R., Bettge, D., De Graeve, I., Dugstad, A., Grassini, S., Hack, T., Halama, M., Han, E., Harder, T., Hinds, G., Kittel, J., Krieg, R., Leygraf, C., Martinelli, L., Mol, A., ... Zheludkevich, M. (2022). Corrosion challenges towards a sustainable society. *Materials and Corrosion*, 73(11), 1730–1751. <https://doi.org/10.1002/maco.202213140>
- Benedito, A. V., Benedetty Torres, C. A., Silva, R. M. de C., Krahl, P. A.,

- Cardoso, D. C. T., Silva, F. de A., & Martins, C. H. (2024). Effects of Niobium Addition on the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Microalloyed Steels: A Review. *Buildings*, 14(5), 1462. <https://doi.org/10.3390/buildings14051462>
- Bodner, M., Senn, J., & Hacker, V. (2018). Degradation Mechanisms and Their Lifetime. In *Fuel Cells and Hydrogen* (pp. 139–154). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811459-9.00007-4>
- Chen, X., Singh, A., Konovalov, S., Hirsch, J. R., & Wang, K. (2018). Corrosion of Materials after Advanced Surface Processing, Joining, and Welding. *International Journal of Corrosion*, 2018, 1–3. <https://doi.org/10.1155/2018/3569282>
- Dong, B., Liu, W., Zhang, T., Chen, L., Fan, Y., Zhao, Y., Yang, W., & Banthukul, W. (2021). Corrosion failure analysis of low alloy steel and carbon steel rebar in tropical marine atmospheric environment: Outdoor exposure and indoor test. *Engineering Failure Analysis*, 129, 105720. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105720>
- Drozda, M., & Miszczyk, A. (2022). Selection of Organic Coating Systems for Corrosion Protection of Industrial Equipment. *Coatings*, 12(4), 523. <https://doi.org/10.3390/coatings12040523>
- Elewa, R. R., Okokpujie, I. P., Monye, S. I., Akinwumi, A. O., & Boluwatife, A. T. (2025). A Review on the Effect of Environmental Factors on the Long Term Stability of Corrosion-Resistant Coating. *NIPES Journal of Science and Technology Research*, 7(2). <https://doi.org/10.37933/nipes/7.4.2025.SI519>
- Fan, Y., Liu, W., Sun, Z., Chowwanonthapunya, T., Zhao, Y., Dong, B., Zhang, T., & Banthukul, W. (2021). Effect of chloride ion on corrosion resistance of Ni-advanced weathering steel in simulated tropical marine atmosphere. *Construction and Building Materials*, 266, 120937. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120937>
- Fontana, M. G., & Greene, N. D. (1986). *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill.
- 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. <https://doi.org/10.3390/app14199062>
- Huang, X., Yang, C., Chen, J., Qiao, X., Zhang, S., & Song, D. (2024). Enhanced Protective Performance of Carbon Nanotube-Reinforced Waterborne Epoxy Zinc-Rich Coatings for Corrosion Protection of Steel Structures. *Coatings*, 14(12), 1493. <https://doi.org/10.3390/coatings14121493>
- Ivošević, Š., Vastag, G., Majerič, P., Kovač, D., & Rudolf, R. (2020). Analysis of the Corrosion Resistance of Different Metal Materials Exposed to Varied Conditions of the Environment in the Bay of Kotor. In *The Handbook of Environmental Chemistry* (pp. 293–326). https://doi.org/10.1007/698_2020_644
- Jose, S. A., Lapierre, Z., Williams, T., Hope, C., Jardin, T., Rodriguez, R., & Menezes, P. L. (2025). Wear- and Corrosion-Resistant Coatings for Extreme Environments: Advances, Challenges, and Future Perspectives. *Coatings*, 15(8), 878. <https://doi.org/10.3390/coatings15080878>
- Klenam, D. E. P., Bodunrin, M. O., Akromah, S., Gikunoo, E., Andrews, A., & McBagonluri, F. (2021). Ferrous materials degradation: characterisation of rust by colour – an overview. *Corrosion Reviews*, 39(4), 297–311.

- <https://doi.org/10.1515/corrrev-2021-0005>
- Kolesnikov, A., Kolek, M., Dohmann, J. F., Horsthemke, F., Börner, M., Bieker, P., Winter, M., & Stan, M. C. (2020). Galvanic Corrosion of Lithium-Powder-Based Electrodes. *Advanced Energy Materials*, 10(15). <https://doi.org/10.1002/aenm.202000017>
- Liu, Q., Cao, Y., Chen, S., Xu, X., Yao, M., Fang, J., Lei, K., & Liu, G. (2024). Hot-Dip Galvanizing Process and the Influence of Metallic Elements on Composite Coatings. *Journal of Composites Science*, 8(5), 160. <https://doi.org/10.3390/jcs8050160>
- Mathew, C., & Adu-Gyamfi, E. (2025). A review on AI-driven environmental-assisted stress corrosion cracking properties of conventional and advanced manufactured alloys. *Corrosion Engineering, Science and Technology: The International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control*, 60(2), 145–158. <https://doi.org/10.1177/1478422X241276727>
- Melchers, R. (2018). A Review of Trends for Corrosion Loss and Pit Depth in Longer-Term Exposures. *Corrosion and Materials Degradation*, 1(1), 42–58. <https://doi.org/10.3390/cmd1010004>
- Pedefferri, P. (2018). Pitting Corrosion. In *Springer* (pp. 207–230). https://doi.org/10.1007/978-3-319-97625-9_11
- Pranata, A., Prabowo, A. R., Do, Q. T., Sohn, J. M., Fitri, S. N., Raharjo, W. P., Wibowo, Kuswardi, Y., & Muttaqie, T. (2025). Degradation of aluminum-based metal in maritime operations: A review of corrosion and welding joint. *Procedia Structural Integrity*, 72, 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.08.118>
- Reda, A., Shahin, M. A., & Montague, P. (2025). Review of Material Selection for Corrosion-Resistant Alloy Pipelines. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es1373>
- Rêgo, G. C., Bandeira, R. M., van Drunen, J., Tremiliosi-Filho, G., & Casteletti, L. C. (2023). Multi-layer organic-inorganic hybrid anticorrosive coatings for protection of medium carbon steel. *Materials Chemistry and Physics*, 303, 127841. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127841>
- Saji, V. S. (2023). Corrosion and Materials Degradation in Electrochemical Energy Storage and Conversion Devices. *ChemElectroChem*. <https://doi.org/10.1002/celec.202300136>
- Shaker, L. M., Alamiery, A., Isahak, W. N. R. W., & Al-Azzawi, W. K. (2023). Corrosion in solar cells: challenges and solutions for enhanced performance and durability. *Journal of Optics*. <https://doi.org/10.1007/s12596-023-01277-9>
- Shravan, C., Radhika, N., Kumar, N. H. D., & Sivasailam, B. (2024). A review on welding techniques: properties, characterisations and engineering applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 10(2), 1126–1181. <https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2186638>
- Song, Q., Wang, X., Pan, B., & Wan, L. (2020). Effect of relative humidity on corrosion of Q235 carbon steel under thin electrolyte layer in simulated marine atmosphere. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 67(2), 187–196. <https://doi.org/10.1108/ACMM-07-2019-2157>
- Wang, M., Yao, H., Liu, Y., Zhu, Y., Chen, W., Xu, Y., & Huang, Y. (2025). Understanding and probing progression of localized corrosion on inner walls of steel pipelines: an overview. *Journal of Iron and Steel Research International*, 32(1), 1–18.

<https://doi.org/10.1007/s42243-024-01213-6>

- Wright, R. F., Lu, P., Devkota, J., Lu, F., Ziomek-Moroz, M., & Ohodnicki, P. R. (2019). Corrosion Sensors for Structural Health Monitoring of Oil and Natural Gas Infrastructure: A Review. *Sensors*, 19(18), 3964. <https://doi.org/10.3390/s19183964>
- Zakerin, N., Morshed-Behbahani, K., Bishop, D. P., & Nasiri, A. (2025). Review of Tribological and Wear Behavior of Alloys Fabricated via Directed Energy Deposition Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(6), 194. <https://doi.org/10.3390/jmmp9060194>