

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Korosi pada Struktur Kapal

Korosi pada kapal adalah proses degradasi elektrokimia yang disebabkan oleh reaksi antara lambung logam dan lingkungan laut. Air laut, yang kaya akan ion klorida, mempercepat proses oksidasi baja karbon, bahan lambung kapal yang paling umum. Kerusakan akibat korosi mengakibatkan hilangnya integritas *structural*, peningkatan biaya perawatan, dan potensi kegagalan *structural*, yang menimbulkan risiko keselamatan yang signifikan (Anwar et al., 2025).

Korosi adalah kehancuran atau kerusakan material karena reaksi dengan lingkungannya, hasil dari proses ini dapat berupa padat, cair dan gas. Korosi pada logam juga dapat diartikan sebagai reaksi kebalikan dari pemurnian logam. Korosi dapat menyebabkan suatu material mempunyai keterbatasan umur pemakaian, dimana material yang diperkirakan untuk pemakaian dalam waktu lama ternyata mempunyai umur yang lebih singkat dari umur pemakaian rata-ratanya. Terjadinya korosi telah mendorong berbagai penelitian mengenai hubungan logam dan lingkungannya (Kurniawati & Budi, 2021).

Korosi terjadi dalam berbagai macam bentuk, mulai dari korosi merata pada seluruh permukaan logam sampai dengan korosi yang terkonsentrasi pada bagian tertentu saja. Korosi pada logam terjadi karena adanya aliran arus listrik dari satu bagian pada ke bagian yang lain di permukaan logam. Aliran arus ini akan menyebabkan hilangnya *metal* pada bagian dimana arus dilepaskan ke lingkungan (oksidasi atau reaksi anoda) (Budianto et al., 2017).

Proses korosi dimulai dengan pembentukan lapisan *adlayer* berair pada permukaan baja. Berbagai faktor, seperti paparan air asin, gelombang laut, fluktuasi suhu, kandungan oksigen, dan pengendapan partikel higroskopis atau produk korosi pada permukaan baja, dapat mempercepat proses korosi. Di lingkungan laut, air asin merupakan elektrolit korosif yang kuat. Oleh karena itu, korosi di lingkungan laut didasarkan pada reaksi elektrokimia antara baja dan air, lapisan film berair, presipitasi berair, kondensasi kelembaban, kondensasi kimia, atau lapisan *film* kondensasi kapiler. Selain itu, aerosol garam (biasanya NaCl atau MgCl) juga dapat berperan mempercepat korosi baja (Vignesh, 2024).

Salah satu teknik pencegahan korosi yang efektif adalah proteksi katodik, yang melibatkan menjadikan logam yang dilindungi bertindak sebagai katoda dalam sel elektrokimia, sehingga mencegah oksidasi. Proteksi katodik dapat diimplementasikan melalui *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP) atau *Sacrificial Anode Cathodic Protection* (SACP) (Anwar et al., 2025).

### 2.2 Struktur Rudder Kapal



Gambar 2. 1 *Rudder* Kapal (Sumber : asmarines.com, 2022)

Struktur *rudder* merupakan komponen krusial dalam sistem kemudi karena berfungsi sebagai permukaan kendali utama untuk mengubah arah gerak kapal di air. Desain dan karakteristik struktur *rudder* tidak hanya mempengaruhi kemampuan *maneuvering* kapal, tetapi juga berhubungan dengan ketahanan *structural* terhadap beban hidrodinamik, benturan, dan korosi lingkungan laut (Tonelli & Vogels, 2024). Studi komprehensif oleh Liu (2017) mengulas berbagai efek desain *rudder* terhadap performa kapal, termasuk faktor-faktor geometri, bahan material, dan konfigurasi sambungan yang berdampak pada kemampuan *maneuverability*, konsumsi bahan bakar, serta fenomena *cavitation* yang dapat memicu degradasi *structural* pada *rudder* akibat tekanan *fluida* yang tinggi (J. Liu & Hekkenberg, 2017).

Pada sebuah kapal tentunya ada beberapa komponen salah satu komponen yang sangat penting, salah satu komponen yang sangat penting pada sebuah perahu merupakan kemudi (*rudder*) inilah kapal dapat dikendalikan (J. Liu & Hekkenberg, 2017).

### 2.3 Zinc Anode



Gambar 2. 2 *Zinc Anode* (Sumber: asmarines.com, 2025)

Proteksi korosi pada struktur kapal yang berada di bawah garis air merupakan tantangan utama dalam teknik perkapalan karena lingkungan laut bersifat sangat korosif akibat ion klorida, oksigen terlarut, dan konduktivitas elektrolit yang tinggi. Salah satu sistem proteksi yang paling umum digunakan adalah proteksi katodik dengan anoda korban (*sacrificial anode*), dimana *zinc anode* berfungsi sebagai material yang lebih aktif secara elektrokimia sehingga akan terkorosi lebih dulu untuk melindungi struktur baja kapal. Sistem ini bekerja dengan cara menghubungkan *anoda zinc* secara listrik ke bagian kapal yang akan dilindungi, sehingga struktur kapal menjadi katoda dan *anoda zinc* yang lebih “reaktif” akan mengalami oksidasi (*sacrifice*) terlebih dahulu, menekan laju korosi pada logam utama kapal. Pendekatan ini sangat penting untuk memperpanjang umur layanan struktur bawah air dan mengurangi degradasi material akibat korosi laut (Ihza Mahendra & Dwisetiono, 2022).

*Zinc anode* sering dipilih dalam proteksi kapal karena memiliki potensi elektrokimia yang lebih *negative* dibandingkan baja, memberikan arus proteksi yang stabil serta umur layanan yang moderat pada lingkungan air laut bersalinitas tinggi. Selain itu, tinjauan literatur menunjukkan bahwa meskipun ada alternatif seperti paduan aluminium atau magnesium, *zinc* tetap menawarkan kesetabilan potensial proteksi dan biaya yang kompetitif dalam aplikasi kapal. Pilihan material *anoda* sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional kapal, resistivitas air laut, dan pertimbangan ekonomi dalam perawatan jangka panjang (Pongsapan & Suhadi, 2015).

Seng adalah material anoda korban yang paling banyak digunakan dalam industri *maritime* karena stabilitasnya dalam air laut. Dengan kapasitas arus sekitar 780 Ah/kg, seng memberikan perlindungan yang memadai untuk struktur baja kapal dalam jangka waktu tertentu. Tingkat konsumsi rata-rata sekitar 11,2 kg per tahun untuk lambung kapal pengangkut curah berukuran sedang, sehingga relatif ekonomis untuk aplikasi jangka menengah. (Anwar et al., 2025)

Keunggulan utama seng adalah pola konsumsinya yang dapat diprediksi dan risiko privasi yang sangat rendah. Hal ini menjadikan seng sebagai pilihan standar untuk kapal yang beroperasi di perairan dengan salinitas tinggi hingga sedang, karena kinerjanya tetap konsisten dalam berbagai kondisi. Selain itu, seng tersedia secara luas di pasaran, menjadikannya solusi yang lebih mudah diakses bagi pemilik kapal. Namun, kelemahan seng terletak pada kepadatannya yang *relative* tinggi, yang meningkatkan berat anoda secara keseluruhan pada kapal yang lebih besar. Meskipun penambahan beratnya tidak ekstrem, hal itu tetap berkontribusi pada massa total kapal dan dapat sedikit meningkatkan konsumsi bahan bakar. Oleh karena itu, seng lebih cocok untuk kapal kargo konvensional atau kapal yang efisiensi beratnya bukan prioritas utama (Anwar et al., 2025).

## 2.4 Efisiensi Proteksi Korosi Menggunakan *Weight Loss Method*

Penilaian efisiensi proteksi korosi bahan logam yang terendam dalam lingkungan korosif sering dilakukan dengan menggunakan *Weight Loss Method*, yaitu metode pengukuran laju korosi berdasarkan perubahan massa *specimen* setelah direndam media korosif untuk periode waktu tertentu. Metode ini menjadi teknik *gravimetric* yang *popular* dalam penelitian korosi karena kesederhanaannya: *specimen* yang telah dibersihkan dan ditimbang sebelum dan setelah pengujian akan memberikan selisih massa yang kemudian dikonversi menjadi *corrosion rate*, sehingga memberikan gambaran laju degradasi material secara kuantitatif. Selain itu metode ini terbukti efektif membandingkan laju korosi pada material yang diberikan proteksi seperti pelapisan, inhibitor, atau proteksi katodik berupa anoda korban seperti *zinc*; meskipun metode ini memberikan nilai rata-rata korosi selama periode uji dan tidak menangkap detail mekanisme korosi *local*, *Weight Loss Method* tetap menjadi dasar evaluasi efisiensi perlindungan korosi dalam berbagai literatur ilmiah (Malaret, 2022).

Menurut artikel penelitian yang membahas tentang pengukuran laju korosi baja di bawah media laut, perubahan massa *specimen* selama periode perendaman digunakan untuk mengevaluasi bagaimana pelindung atau perlakuan tertentu (seperti lapisan pelindung atau anoda korban) menurunkan laju korosi dibanding kondisi tanpa perlindungan. Metode ini menjadi *indicator* efisiensi proteksi karena laju korosi yang lebih rendah menunjukkan keberhasilan perlindungan dalam memperlambat degradasi material (Vourna et al., 2025).

## 2.5 Konsep *Life Cycle Cost Analysis* dalam Sistem Proteksi Korosi

*Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam mengalisis keputusan investasi untuk memperbaiki kerusakan akibat korosi. LCCA telah terbukti berguna dalam membantu insinyur atau lembaga transportasi mengevaluasi keputusan pemeliharaan optimal dalam masalah yang berkaitan dengan korosi. Alat ini dapat digunakan sebagai alat analisis ekonomi teknik yang membantu dalam mengkuantifikasi biaya diferensial dan memilih langkah-langkah perbaikan korosi yang paling efisien secara biaya. Untuk mendapatkan analisis yang lebih andal, praktik terbaik LCCA tidak hanya harus mempertimbangkan pengeluaran lembaga tetapi juga biaya pengguna dan analisis *sensitivitas* sepanjang masa layanan tidakkan perbaikan. (How & Rahman, 2004).

*Life Cycle Cost Analysis* didefinisikan oleh Administrasi Jalan Raya Federal Amerika Serikat sebagai proses untuk mengevaluasi nilai ekonomi total dari investasi proyek yang dapat digunakan dengan menganalisis biaya awal dan biaya masa depan yang didiskontokan, seperti biaya pemeliharaan, penggunaan, rekonstruksi, rehabilitasi, pemulihan, peremajaan permukaan, dan pembuangan, selama masa pakai segmen proyek (How & Rahman, 2004).

## 2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya bertujuan untuk memperoleh dan memahami perbandingan atau referensi dalam penelitian saat ini. Selain itu, hal ini juga mencegah terjadinya kemiripan dengan studi-studi sebelumnya. Untuk tujuan itu, dalam Tinjauan Pustaka ini, peneliti menyajikan temuan dari penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu (Sumber: Penulis, 2026)

NO.	Judul Penelitian	Tahun Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian
1.	“ <i>Cathodic Protection Using Zinc Anode to Inhibit Corrosion on the Hull of Ship Port Link VII Jakarta</i> ” – Teddy Ihza Mahendra & Dwisetiono.	2022	Eksperimen lapangan dan analisis laju korosi..	Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemasangan <i>zinc anode</i> mampu menurunkan laju korosi pada lambung kapal secara signifikan dibandingkan kondisi tanpa proteksi. Laju korosi yang diukur setelah pemasangan <i>anode</i> berada pada kategori aman menurut standar perkapalan. Penelitian ini menegaskan pentingnya kontinuitas listrik antara <i>anode</i> dan struktur, meskipun tidak membahas pengaruh variasi metode instalasi <i>anode</i> secara spesifik.
2.	“Pemasangan <i>Zinc Anode Protection (ZAP)</i> sebagai Perlindungan Aktif Korosi pada Kapal” – Benny Hartanto & Salim	2023	Studi kasus dan observasi teknis.	Studi ini menemukan bahwa efektivitas <i>zinc anode</i> sangat dipengaruhi oleh metode pemasangan dan kualitas koneksi listrik dengan struktur kapal. <i>Anode</i> yang dipasang dengan koneksi kurang baik menunjukkan konsumsi yang tidak merata serta perlindungan yang tidak optimal. Peneliti menekankan pentingnya parameter instalasi, namun belum mengkuantifikasi laju korosi menggunakan metode <i>gravimetric</i> .

3.	“Analisis Pengaruh Luas Permukaan <i>Zinc Anoda</i> terhadap Laju Korosi” – Sonja T. A. Lekatompessy	2024	Analisis kuantitatif <i>Weight Loss Method</i> dan perhitungan laju korosi.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan luas permukaan <i>zinc anode</i> berbanding lurus dengan penurunan laju korosi struktur kapal. Struktur dengan rasio <i>anode</i> yang lebih besar menunjukkan konsumsi <i>anode</i> yang lebih stabil dan laju korosi yang lebih rendah. Namun, penelitian ini tidak mempertimbangkan pengaruh diskontinuitas struktural terhadap efisiensi distribusi proteksi.
4.	“ <i>Performance Evaluation of Zinc Anodes for Cathodic Protection of Mild Steel Corrosion</i> ” – Cleophas Akintoye Loto et al.	2019	<i>Weight Loss Method</i> dan uji elektrokimia.	Hasil menunjukkan bahwa karbon yang dilindungi <i>zinc anode</i> mengalami penurunan kehilangan massa secara signifikan dibandingkan <i>specimen</i> tanpa proteksi. Efisiensi proteksi <i>zinc anode</i> dibuktikan melalui laju korosi yang lebih rendah serta konsumsi anode yang konstan. Studi ini menegaskan bahwa <i>weight loss method</i> efektif digunakan untuk mengevaluasi kinerja proteksi katodik.
5.	“ <i>Electrochemical Performance of Sacrificial Anode Metals in Preventing Corrosion on Ships</i> ” – S. Anwar et al.	2025	<i>Literature review</i> sistematis	Review ini menyimpulkan bahwa <i>zinc anode</i> memiliki kestabilan potensial yang baik untuk aplikasi kapal dan memberikan perlindungan efektif pada struktur baja di laut. Dibandingkan anoda lain, <i>zinc</i> menunjukkan keseimbangan optimal antara efisiensi proteksi dan laju konsumsi. Namun, penelitian ini belum mengaitkan pengaruh struktural <i>anode</i> dengan metode instalasi <i>structural</i> .
6.	“Studi Penggunaan Zinc Anoda untuk Mengurangi Laju Korosi dalam Industri Perkapalan” – Sonja T. A. Lekatompessy	2025	Studi komparatif pada beberapa kapal.	Penelitian ini menyimpulkan bahwa variasi berat dan jenis <i>zinc anode</i> memberikan perbedaan signifikan terhadap laju korosi kapal. Kapal dengan desain proteksi katodik yang optimal menunjukkan penurunan laju korosi hingga lebih dari 50%.

				40%. Studi ini menyoroti pentingnya optimasi desain sistem <i>anode</i> , namun tidak membahas metode sambungan atau aspek siklus hidup.
7.	“ <i>Review of Cathodic Protection Tecknology for Steel Rebars in Marine Environment</i> ” – Z. Guo et al.	2024	Review teknis dan komparatif.	Studi ini menunjukkan bahwa kegagalan proteksi katodik seringkali bukan disebabkan oleh material <i>anode</i> , tetapi oleh desain instalasi dan distribusi arus yang tidak merata akibat diskontinuitas <i>structural</i> . Hal ini memperkuat pentingnya kaji ulang pengaruh sambungan <i>struc</i> terhadap efisiensi proteksi terhadap korosi.
8.	“ <i>Life Cycle Cost Analysis Case Study on Corrosion Remedial Measures for Concrete Structures</i> ” – Ho Jin How & A. Rahman	2012	<i>Life Cycle Cost Analysis (LCCA)</i>	Studi ini menunjukkan bahwa metode proteksi dengan pendekatan jangka panjang menghasilkan biaya total yang lebih rendah dibandingkan perbaikan-perbaikan berulang tanpa sistem proteksi. Analisis LCC menegaskan pentingnya mempertimbangkan umur pakai sistem proteksi dalam pengambilan keputusan te

**Kesimpulan:**

Berdasarkan delapan penelitian terdahulu, menunjukkan bahwa umumnya membahas efektivitas *zinc anode* menurunkan laju korosi pada struktur kapal melalui sistem proteksi katodik, dengan menekankan pada pemilihan material *anode*, luas permukaan, jumlah anode, serta kualitas kontak listrik. Pada penelitian terdahulu belum terdapat penelitian yang meneliti perbedaan laju korosi melalui perbedaan instalasi pada *zinc anode* serta perhitungan biaya melalui *Life Cycle Cost Analysis*. Kesenjangan ini menegaskan perlunya penelitian yang khusus mengkaji efisiensi dari perbedaan metode instalasi *zinc anode* melalui *Weight Loss Method* dan *Life Cycle Cost Analysis*.