



2580-2798 (e)  
2588-6225 (p)

**Inovtek Polbeng: Jurnal Inovasi Teknologi Politeknik Negeri Bengkalis**  
(Bengkalis State Polytechnic Technology Innovation Journal)

journal homepage: <https://jurnal.polbeng.ac.id/index.php/IP/index>

## **ANALISIS KEBUTUHAN ZINC ANODE PADA SISTEM PROTEKSI KATODIK ELNUSA SAMUDERA 8 ACCOMMODATION BARGE**

Muh Yusril Syam<sup>1)</sup>, Muhammad Arsyad<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Teknik Perkapalan Politeknik Batulicin, Jl. Malewa Raya Komplek Maming One Residence, Tanah Bumbu, Kalimantan Selatan, Indonesia 72273

Corresponding Author\*: [yusril@politeknikbatulicin.ac.id](mailto:yusril@politeknikbatulicin.ac.id)

---

### Article Info

### Abstract

#### Keywords:

Proteksi Katodik; Zinc Anode;  
Sacrificial Anode; Korosi;  
Accommodation Barge;  
DNV-RP-B401; NACE SP0176.

#### Article history:

Received: 22/12/2025  
Last revised: 24/04/2026  
Accepted: 28/05/2026  
Available online: 02/06/2026  
Published: 02/06/2026

DOI:<https://doi.org/10.35314/y6a47651>

### Abstrak

Struktur baja pada kapal dan bangunan lepas pantai sangat rentan terhadap korosi akibat paparan air laut yang mengandung ion klorida tinggi, khususnya pada lingkungan laut payau yang agresif seperti Delta Mahakam, Kalimantan Timur. Kondisi ini berpotensi mempercepat degradasi ketebalan pelat lambung, menurunkan keandalan struktur, serta meningkatkan biaya pemeliharaan dan risiko gangguan operasional. Penelitian ini bertujuan menganalisis kebutuhan *zinc anode* yang optimal pada sistem proteksi katodik Elnusa Samudera 8 *Accommodation Barge* dengan mengacu pada standar NACE dan DNV, meliputi penentuan total arus proteksi, massa, jumlah, serta konfigurasi anoda sesuai umur desain. Metode penelitian dilakukan melalui perhitungan arus proteksi berdasarkan luas area terbasahi, densitas arus desain, kapasitas anoda, serta evaluasi distribusi dan efisiensi proteksi. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem proteksi katodik dengan 82 unit *zinc anode* mampu menyediakan arus proteksi sebesar 27,65 A dengan efisiensi mendekati 100% dan umur proteksi lima tahun. Sistem ini menekan laju korosi hingga di bawah batas aman serta berpotensi memperpanjang umur struktur lebih dari 20 tahun melalui penggantian anoda berkala. Temuan ini menunjukkan bahwa desain sistem proteksi katodik yang diterapkan telah memenuhi aspek teknis dan standar perancangan yang digunakan.

### Abstract

Steel structures on ships and offshore buildings are highly susceptible to corrosion due to exposure to seawater containing high levels of chloride ions, particularly in aggressive marine-brackish environments such as the Mahakam Delta in East Kalimantan. These conditions have the potential to accelerate the degradation of hull plate thickness, reduce structural reliability, and increase maintenance costs and the risk of operational disruptions. This study aims to analyze the optimal *zinc anode* requirements for the Elnusa Samudera 8 *Accommodation Barge* cathodic protection system, with reference to NACE and DNV standards. This includes determining the total protection current, mass, number, and configuration of anodes according to the design life. The research method involved calculating the protection current based on the wetted area, design current density, anode capacity, and evaluating the protection distribution and efficiency. The analysis results show that the cathodic protection system with 82 *zinc anode* units is capable of providing a protection current of 27.65 A with an efficiency of nearly 100% and a protection life of five years. This system reduces the corrosion rate to below the safety limit and has the potential to extend the structure's lifespan to more than 20 years through periodic anode replacement. These findings indicate that the cathodic protection system design implemented has met the relevant technical requirements and design standards.

---

## 1. PENDAHULUAN

Sistem konstruksi baja pada kapal dan bangunan lepas pantai memegang peranan penting dalam aspek keselamatan serta kelancaran operasional maritim. Terlepas dari itu, kerentanan struktur bawah laut terhadap korosi sangat tinggi karena paparan air laut secara terus-menerus yang mengandung ion

klorin dalam jumlah besar. Apabila mitigasi korosi tidak dilakukan secara efektif, konsekuensi yang akan terjadi meliputi degradasi ketebalan pelat baja lambung, kebocoran, kerusakan struktur, dan berujung pada peningkatan biaya perawatan dan kerugian akibat waktu henti operasi kapal yang berkepanjangan. Sehubungan dengan hal tersebut, tindakan menghambat laju korosi sangat penting dalam perancangan dan pemeliharaan struktur kapal, khususnya pada unit akomodasi seperti Elnusa Samudera 8 yang beroperasi di lingkungan laut payau Delta Mahakam, Kalimantan Timur. Kawasan ini merupakan wilayah operasi migas terbesar di Indonesia, dengan karakteristik lingkungan yang agresif terhadap baja. Selain itu, kombinasi kondisi fisik dan kimia di Delta Mahakam secara oseanografi diketahui mempercepat laju korosi pada struktur bawah air kapal dan lepas pantai.

Berbagai metode yang efektif telah digunakan dalam mengendalikan korosi di sektor industri perkapalan dan industri minyak dan gas, salah satunya yaitu sistem proteksi katodik. Sistem ini bekerja dengan cara menghubungkan logam yang ingin dilindungi ke logam lain yang mudah terkorosi. Pendekatan sistem yang sering digunakan pada struktur kapal yaitu menggunakan sistem *Sacrificial Anode Cathodic Protection* (SACP) karena memiliki desain yang sederhana dan tidak memerlukan sumber energi eksternal, serta proses perawatan yang lebih mudah. Bahan logam yang digunakan dalam sistem ini berupa seng, aluminium, dan magnesium sebagai pelindung bagian utama struktur dari paparan korosi.

Sejumlah studi penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi keberhasilan sistem proteksi katodik dengan pendekatan sistem SACP, meliputi penggunaan SACP pada kapal kelas menengah dinilai lebih ekonomis dan menjamin perlindungan yang lebih merata [1], standar *National Association of Corrosion Engineers* (NACE) memastikan kebutuhan anoda dapat menghasilkan umur pakai yang akurat [2], *zinc anode* bekerja optimal dan memenuhi standar keselamatan proteksi pada laju korosi lambung kapal [3], rancangan SACP kapal tugboat mengaplikasikan pendekatan praktis pada total area bidang basah kapal [4], jarak anoda berdampak pada potensi proteksi SACP dalam simulasi [5], peningkatan umur anoda sebesar 30 – 40% tercapai melalui penyesuaian SACP dengan lingkungan perairan [6], tingkat konsumsi *zinc anode* lebih rendah dibandingkan dengan anode aluminium dalam kondisi lingkungan laut [7], prinsip dasar SACP menyajikan formula perhitungan arus proteksi dan efisiensi anoda untuk desain proteksi korosi [8], pengujian SACP pada pipa minyak 16 inch berhasil menjaga potensial struktur dalam batas spesifikasi [9], *zinc anode* sangat andal dalam melindungi kapal yang sering berada dalam kondisi berlabuh [10], variasi kualitas *zinc anode* dapat menyebabkan perbedaan kapasitas arus sekitar 15% [11], *zinc anode* paling cocok digunakan dalam kondisi air laut yang resistivitasnya sedang [12], SACP cocok digunakan pada struktur yang tidak membutuhkan arus tinggi [13], struktur berukuran besar yang hanya membutuhkan sedikit arus, *zinc anode* menjadi pilihan yang tepat [14].

Beberapa penelitian internasional turut memperkuat penelitian ini diantaranya kinerja anoda karbon Zn dan Al untuk proteksi struktur laut harus dipertimbangkan bersamaan dengan implikasi lingkungan [15], dalam lingkungan HCl, *zinc anode* memberikan perlindungan katodik pada *mild steel* yang dibuktikan melalui metode kehilangan berat dan pengukuran potensial [16], pengaruh *fouling* pada *zinc anode* yang berdampak pada perubahan distribusi arus dan efisiensinya [17], laju konsumsi Zn sangat dipengaruhi oleh peningkatan suhu, kecepatan arus, dan kadar NaCl [18], SACP dianggap sangat layak untuk struktur laut asalkan desainnya dilakukan dengan cermat [19], sebuah metode kontrol arus anoda yang efektif dalam memperpanjang masa pakai anoda hingga 35,5 kali dibandingkan dengan penggunaan sistem konvensional [20], kriteria proteksi katodik pada kapal mencakup parameter proteksi dan pedoman praktik [21], perbandingan anoda Al dan Zn menunjukkan Zn stabil di air laut, namun efisiensi dan efektivitas arusnya bergantung pada paduan dan kondisi permukaan [22], proteksi katodik jangka panjang menunjukkan penurunan potensial korosi dan densitas arus pada struktur setelah pemasangan *zinc anode* [23], pemetaan distribusi arus dari lapisan *zinc anode* menunjukkan variasi densitas arus pada jarak tertentu [24].

Walaupun sebagian besar penelitian terdahulu telah membahas sistem proteksi katodik, kajian tersebut umumnya masih berfokus pada kapal niaga atau bangunan lepas pantai secara umum, tanpa secara spesifik mempertimbangkan karakteristik operasional kapal akomodasi tipe *barge* yang memiliki kondisi operasi, yaitu dominasi beban semi-statis dengan paparan air laut yang luas serta durasi operasional jangka panjang di lokasi pengeboran minyak. Selain itu, penelitian sebelumnya cenderung hanya mengevaluasi proteksi pada lambung luar, tanpa mengintegrasikan kebutuhan proteksi pada area internal seperti tangki ballast dan tangki air laut yang juga rentan terhadap korosi.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, kebaruan dalam penelitian ini terletak pada pendekatan menyeluruh dalam perhitungan kebutuhan *zinc anode* yang tidak hanya mempertimbangkan kondisi lambung eksternal, tetapi juga mencakup area internal struktur kapal. Selain itu, penelitian ini mengadopsi pendekatan berbasis arus proteksi aktual dengan mempertimbangkan variabel-variabel seperti luas permukaan terproteksi, umur desain, efisiensi anoda, serta karakteristik lingkungan laut yang diaplikasikan secara langsung pada kondisi operasi semi-statis kapal akomodasi. Kebaruan lainnya adalah adanya validasi hasil perhitungan melalui penerapan konfigurasi anoda pada studi kasus nyata, yaitu kapal Elnusa Samudera 8, sehingga tidak hanya bersifat teoritis tetapi juga merepresentasikan kondisi lapangan yang sesungguhnya di perairan Indonesia.

Penelitian ini bertujuan menganalisis kebutuhan *zinc anode* yang optimal mengacu pada standar *National Association of Corrosion Engineers* (NACE) dan *Det Norske Veritas* (DNV) untuk menentukan total arus proteksi, jumlah, massa, serta konfigurasi anoda yang sesuai dengan umur desain yang direncanakan.

Adapun manfaat dari penelitian ini dibagi menjadi dua aspek, yaitu secara teoritis dapat menjadi referensi akademik dalam pengembangan perhitungan kebutuhan anoda berbasis arus proteksi untuk struktur bawah laut. Secara praktis, hasil studi ini dapat dijadikan referensi oleh perusahaan pelayaran dan industri maritim dalam perencanaan proteksi katodik sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan anoda, memperpanjang umur struktur, serta menekan biaya pemeliharaan kapal.

## 2. METODE

### 2.1 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah sistem proteksi katodik yang diterapkan pada bagian lambung bawah dan *void tank* kapal Elnusa Samudera 8 *accommodation barge* dengan metode *sacrificial anode cathodic protection* (SACP) menggunakan material *zinc anode*. Fokus kajian diarahkan pada area struktur baja yang terendam air laut secara permanen dan memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap korosi elektrokimia.

Untuk memberikan gambaran umum mengenai objek penelitian dan konteks penerapan sistem proteksi katodik, ditampilkan dokumentasi kapal pada Gambar 1 yang menunjukkan kondisi fisik kapal serta ilustrasi area pemasangan *zinc anode* pada lambung bawah. Visualisasi ini digunakan sebagai acuan dalam mengidentifikasi zona proteksi, distribusi anoda, jarak pemasangan antar anoda, serta keterkaitannya dengan konfigurasi struktur lambung dan void tank kapal.



**Gambar 1.** Elnusa Samudera 8 *Accommodation Barge*  
Sumber: Dokumentasi penulis, 2025

Data penelitian diperoleh dari PT Elnusa Samudera sebagai operator kapal, yang meliputi data spesifikasi teknis struktur, konfigurasi sistem proteksi katodik, serta dokumen pendukung hasil inspeksi terkait kondisi struktur bawah air. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam analisis perhitungan kebutuhan arus proteksi dan penentuan jumlah *zinc anode* yang diperlukan, dengan mempertimbangkan luas permukaan lambung yang terendam dan umur rencana proteksi sesuai kondisi aktual operasional kapal.

## 2.2 Variabel Penelitian

Penelitian ini menetapkan variabel tetap berupa penggunaan *zinc alloy* sebagai material anoda sesuai standar ASTM B418 Type II, material struktur baja kapal, serta kondisi lingkungan operasi perairan laut tropis. Variabel bebas yang dianalisis meliputi luas permukaan baja yang diproteksi, densitas arus proteksi, dan umur desain anoda.

Perlakuan terhadap objek penelitian dilakukan melalui analisis perhitungan kebutuhan arus proteksi dan penentuan jumlah serta berat *zinc anode* berdasarkan kondisi aktual kapal. Pendekatan ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variabel desain terhadap efisiensi sistem proteksi katodik dan memperoleh konfigurasi anoda yang optimal serta sesuai dengan kebutuhan operasional *accommodation barge*.

## 2.3 Metode Analisis Data

Metode analisis data dalam penelitian ini menggunakan pendekatan perhitungan kebutuhan arus proteksi (*current demand method*) yang mengacu pada standar NACE SP0176 dan DNV-RP-B401. Metode ini umum digunakan dalam perancangan sistem proteksi katodik struktur laut karena mampu memberikan estimasi kebutuhan arus dan jumlah anoda secara terstruktur pada tahap perencanaan teknis.

Pendekatan ini menghitung kebutuhan arus proteksi berdasarkan luas permukaan baja yang terendam, sifat material, serta kondisi lingkungan operasi, sehingga memungkinkan evaluasi kebutuhan anoda secara kuantitatif. Meskipun demikian, keakuratan hasil perhitungan sangat bergantung pada pemilihan nilai densitas arus proteksi yang digunakan. Oleh karena itu, penentuan densitas arus dalam penelitian ini disesuaikan dengan kondisi aktual kapal dan lingkungan operasinya, serta didukung oleh data teknis dan referensi standar, agar hasil analisis mencerminkan kebutuhan proteksi yang realistis dan optimal.

## 2.4 Prosedur Penelitian

Tahapan analisis dalam penelitian ini dilakukan secara berurutan sebagai berikut:

### 1. Perhitungan Luas Permukaan Terendam (A)

Luas permukaan struktur kapal yang terendam air laut dihitung berdasarkan gambar rencana garis (*lines plan*) dan ukuran utama kapal, sehingga diperoleh estimasi area baja yang memerlukan proteksi katodik.

### 2. Penentuan Kebutuhan Arus Proteksi ( $I_p$ )

Kebutuhan arus proteksi dihitung berdasarkan standar NACE SP0176 dan DNV-RP-B401 dengan mempertimbangkan karakteristik lingkungan operasi kapal, dapat menggunakan persamaan 1:

$$I_p = i_d \times A \quad (1)$$

Dimana:

$i_d$  adalah densitas arus proteksi ( $A/m^2$ )

A adalah luas permukaan terendam ( $m^2$ )

### 3. Perhitungan Berat dan Jumlah Anoda (W)

Berat total anoda yang diperlukan ditentukan menggunakan persamaan 2:

$$W = \frac{I_p \times t \times 8760}{C \times U} \quad (2)$$

Dimana:

$I_p$  adalah arus proteksi

t adalah umur rencana proteksi (tahun)

C adalah kapasitas elektrokimia anoda (A. jam/kg)

U adalah efisiensi anoda (%)

### 4. Penentuan Distribusi dan Penempatan Anoda

Berdasarkan hasil perhitungan berat dan jumlah anoda, dilakukan perancangan distribusi dan penempatan anoda secara merata pada area lambung bawah kapal. Tahap ini bertujuan untuk memastikan sebaran potensial proteksi yang seragam dan efektif pada seluruh permukaan baja yang terendam.

### 5. Evaluasi dan Validasi Hasil

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan jarak pemasangan anoda hasil perhitungan dengan jarak aktual di lambung luar Elnusa Samudera 8 *Accommodation Barge*. Analisis difokuskan pada kesesuaian spasi antar anoda dan distribusinya terhadap cakupan proteksi. Perbedaan jarak dievaluasi untuk mengidentifikasi potensi *under-protection* (jarak terlalu renggang) atau ketidakefisienan akibat jarak yang terlalu rapat.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Analisis Kebutuhan Zinc Anode

Perhitungan kebutuhan *zinc anode* pada sistem proteksi katodik Elnusa Samudera 8 *Accommodation Barge* dilakukan dengan mengacu pada data geometrik kapal dan parameter desain proteksi katodik sesuai standar DNV-RP-B401 dan NACE SP0176. Parameter ini digunakan untuk menentukan arus proteksi, massa anoda, serta jumlah anoda yang diperlukan guna menjamin perlindungan struktur baja terhadap korosi selama umur desain. Analisis ini menggunakan data lambung luar kapal yang tercelup dalam air laut sebagai dasar/perwakilan untuk menghitung kebutuhan anoda di seluruh lokasi, termasuk permukaan baja di dalam tangki. Luas area terproteksi ditetapkan berdasarkan pendekatan luas permukaan basah (*wetted surface area*) dengan densitas arus desain sebesar  $35 \text{ mA/m}^2$  dan umur proteksi 5 tahun, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Data utama kapal

Parameter	Nilai	Satuan
Panjang antara garis tegak (LBP)	60,96	m
Lebar (Breadth)	18,29	m
Sarat air (Draft)	2,50	m
Koefisien blok (Cb)	1,00	-
Luas area lambung luar yang diproteksi	790,00	m <sup>2</sup>
Densitas arus desain	35,00	mA/m <sup>2</sup>
Umur desain proteksi	5	tahun
Kapasitas arus anoda	780,00	Ah/kg
Berat per anoda	31,00	kg

Berdasarkan dimensi utama kapal pada Tabel 1, yaitu panjang (L) 60,96 m, lebar (B) 18,29 m, dan sarat (T) 2,50 m, secara teoritis luas permukaan basah total kapal dapat diperkirakan dari kombinasi luas dasar (*bottom area*) dan sisi (*side shell area*). Namun, dalam implementasinya, tidak seluruh area tersebut dilindungi dengan sistem yang sama. Sistem proteksi katodik dibagi menjadi dua zona utama, yaitu: (1) zona buritan (*after*) hingga *midship* yang menggunakan sistem *Sacrificial Anode Cathodic Protection* (SACP), dan (2) zona haluan (*fore*) hingga *midship* yang menggunakan sistem *Impressed Current Cathodic Protection* (ICCP).

Berdasarkan pendekatan tersebut dan interpretasi langsung terhadap desain *layout* distribusi anoda area lambung luar, diperoleh luas area terproteksi efektif sebesar 790 m<sup>2</sup>. Nilai ini merepresentasikan area aktual yang membutuhkan suplai arus dari *zinc anode*, khususnya pada *bottom* dan *side shell* di zona buritan hingga *midship*, dengan mempertimbangkan batas sistem proteksi, kondisi perendaman, serta distribusi anoda.

a) Arus Proteksi Anoda

Total arus yang dibutuhkan ( $I_{total}$ ) pada area lambung luar dihitung dengan mengalikan kerapatan arus desain ( $i_d$ ) dengan area yang akan dilindungi (A).

$$I_p = i_d \times A$$

$$I_p = 35 \text{ mA/m}^2 \times 790 \text{ m}^2$$

$$I_p = 27,65 \text{ A}$$

Jumlah total arus minimum yang harus disediakan oleh sistem *zinc anode* untuk menjaga seluruh struktur area lambung luar tetap aman dari korosi selama masa operasionalnya sebesar 27,65 A.

b) Total Berat Anoda

$$W = \frac{I_p \times t \times 8760}{C \times U}$$

$$W = \frac{27,65 \text{ A} \times 5 \text{ tahun} \times 8.760 \text{ jam/tahun}}{780 \text{ A. jam/kg} \times 1}$$

$$W = \frac{1.211.070 \text{ A. jam}}{780 \text{ A. jam/kg}}$$

$$W = 1.552,65 \text{ kg}$$

Berat total anoda yang diperlukan pada area lambung luar adalah 1.552,65 dengan asumsi faktor pemanfaatan ( $U$ ) = 1, yang merepresentasikan kondisi ideal di mana seluruh massa anoda dapat terpakai secara efektif selama umur desain. Asumsi ini didukung oleh penggunaan anoda seng dengan karakteristik pelarutan stabil serta penempatan yang dirancang untuk distribusi arus yang merata.

c) Total Anoda yang Dibutuhkan

$$W = \frac{W_{total}}{W_{anoda}}$$

$$W = \frac{1552,65 \text{ kg}}{31 \text{ kg}}$$

$$W = 50 \text{ unit}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kebutuhan *zinc anode* untuk proteksi lambung luar Elnusa Samudera 8 *Accommodation Barge* ditetapkan sebanyak 50 unit. Nilai ini merepresentasikan kebutuhan minimum anoda yang harus dipasang pada area *bottom* dan *side shell* yang tercelup dalam air laut, berdasarkan parameter arus proteksi, efisiensi anoda, kondisi lingkungan operasi, serta spesifikasi berat anoda tunggal sebesar 31 kg. Dengan demikian, angka 50unit secara khusus mengacu pada kebutuhan proteksi katodik untuk area eksternal kapal.

Selanjutnya, sistem proteksi katodik pada kapal ini tidak hanya mencakup lambung luar, tetapi juga meliputi area internal yang terekspos terhadap lingkungan korosif, seperti tangki *water ballast* dan *brine/drill water*. Kebutuhan anoda pada area internal tersebut dihitung secara terpisah dengan mempertimbangkan karakteristik lingkungan di dalam tangki, distribusi area, serta rekomendasi standar desain.

Rekapitulasi total kebutuhan anoda yang mencakup area eksternal dan internal disajikan pada Tabel 2. Dari tabel tersebut terlihat bahwa tambahan kebutuhan anoda pada tangki internal berjumlah 32 unit, sehingga total keseluruhan anoda dalam sistem proteksi katodik menjadi 82 unit. Dengan demikian, dapat ditegaskan bahwa angka 82unit merupakan kebutuhan total sistem, sedangkan 50unit merupakan komponen utama yang dialokasikan khusus untuk perlindungan lambung luar.

**Tabel 2.** Rekapitulasi Total Kebutuhan Anoda pada Sistem Proteksi Katodik

Kategori	Lokasi Pemasangan Anoda	Jumlah (Unit)
Lambung Eksternal	Lambung bagian luar kapal yang terendam air	50
	Permukaan interior tangki air ballast (WB) No. 1 (P&S)	8
	Permukaan interior tangki air ballast (WB) No. 2 (P&S)	8
Tangki Internal	Permukaan interior tangki air lumpur ( <i>Brine/Drill Water</i> ) No. 1 (P&S)	8
	Permukaan interior tangki WB No. 1 (CL)	4
	Permukaan interior tangki air lumpur ( <i>Brine/Drill Water</i> ) No. 1 (CL)	4
<b>Total Keseluruhan</b>		<b>82</b>

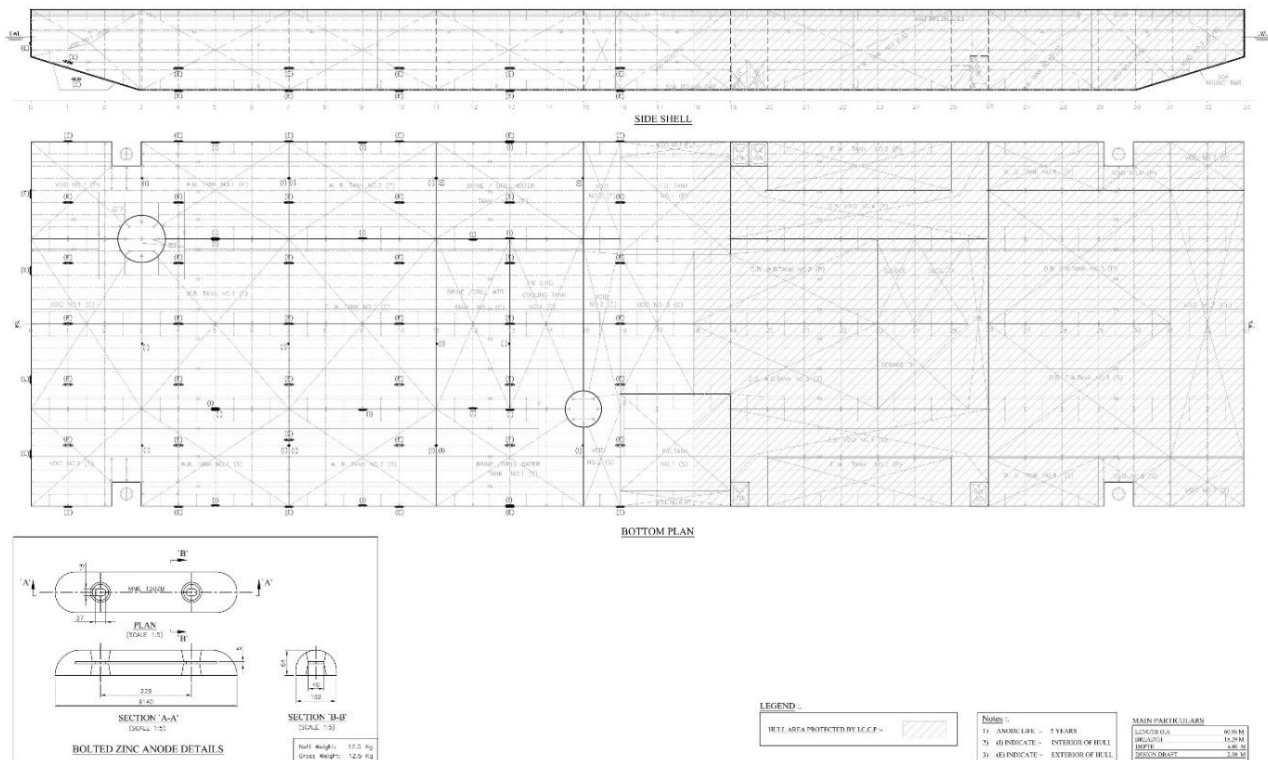
Berdasarkan rekapitulasi pada Tabel 2, proporsi jumlah anoda mencerminkan dominasi luas area terendam serta paparan langsung terhadap lingkungan air laut yang memiliki konduktivitas tinggi dan kandungan oksigen terlarut yang signifikan, sehingga mempercepat laju reaksi korosi elektrokimia [25], [26]. Sementara itu, kebutuhan anoda pada tangki internal (*ballast tank* dan *brine/drill water tank*) berkisar antara 4–8 unit per kompartemen, yang didistribusikan secara simetris pada sisi *port*, *starboard*, dan *center line* sesuai rekomendasi standar yang menekankan bahwa fluktuasi pengisian, perbedaan aerasi, dan potensi stagnasi fluida dapat memicu korosi lokal yang agresif meskipun luas area relatif lebih kecil [27], [28].

Secara kuantitatif, distribusi anoda telah memenuhi pendekatan desain berbasis luas area dan kebutuhan arus proteksi. Namun demikian, evaluasi lebih lanjut menunjukkan bahwa kesesuaian terhadap standar DNV dan NACE tidak serta-merta menjamin performa optimal apabila kondisi operasional aktual menyimpang dari asumsi desain.

Dari sisi kepadatan arus desain ( $35 \text{ mA/m}^2$ ), nilai ini berada dalam rentang yang umum direkomendasikan untuk struktur baja di air laut. Jika kepadatan arus yang diterapkan lebih rendah dari nilai desain, maka terdapat risiko bahwa potensial proteksi tidak mencapai nilai protektif (umumnya sekitar  $-0,80 \text{ V}$  hingga  $-1,05 \text{ V}$  terhadap  $\text{Ag/AgCl}$ ). Kondisi ini dapat menyebabkan terbentuknya area *under-protected*, khususnya pada zona dengan turbulensi tinggi atau kerusakan *coating*, yang berpotensi memicu korosi lokal (*pitting corrosion*) yang sulit terdeteksi secara dini. Sebaliknya, jika kepadatan arus terlalu tinggi, maka dapat terjadi fenomena *overprotection* yang berisiko menimbulkan *coating disbondment* akibat evolusi gas hidrogen serta meningkatkan konsumsi anoda secara tidak efisien, sehingga memperpendek umur desain sistem.

Selain itu, asumsi faktor pemanfaatan anoda (*utilization factor*) sebesar 1,00 dipilih karena apabila faktor pemanfaatan aktual lebih rendah (misalnya 0,80–0,90), maka massa efektif anoda yang dapat dikonsumsi akan berkurang, sehingga umur proteksi menjadi lebih pendek daripada yang direncanakan. Konsekuensinya, interval penggantian anoda menjadi lebih sering dan berpotensi meningkatkan biaya operasional serta risiko kegagalan proteksi apabila tidak dilakukan inspeksi berkala.

Selanjutnya, Gambar 2 menyajikan gambaran mengenai tata letak, jumlah, dan pola pemasangan anoda pada lambung bawah serta area internal kapal yang dirancang sesuai dengan hasil perhitungan dan mempertimbangkan aspek teknis proteksi katodik.



**Gambar 2.** Detail Layout Pemasangan Anoda Area Bottom dan Side Sheel Elnusa Samudera 8 Accommodation Barge. Sumber: Olahan penulis, 2025

Gambar 2 menunjukkan konfigurasi pemasangan *zinc anode* pada lambung luar Elnusa Samudera 8 Accommodation Barge yang dirancang berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan anoda dan distribusi arus proteksi. Anoda ditempatkan secara menyebar dan relatif merata di area lambung yang terendam air laut dengan orientasi memanjang kapal, sehingga suplai arus proteksi dapat terdistribusi secara homogen dan risiko terjadinya zona *under-protection* dapat diminimalkan. Penempatan anoda disesuaikan dengan pembagian struktur dan kompartemen utama kapal, seperti *frame* dan *stiffener*, guna memastikan setiap segmen struktur memperoleh perlindungan yang seimbang. Jumlah dan jarak antar anoda konsisten dengan hasil perhitungan, yaitu 50 unit untuk lambung luar, yang mencerminkan keterpaduan antara pendekatan perhitungan teoritis dan pertimbangan teknis pemasangan di lapangan. Selain itu, orientasi anoda dirancang untuk menjamin kontak listrik yang baik dengan struktur baja, sementara pemasangan yang simetris antara sisi *port* dan *starboard* mendukung terciptanya distribusi potensial yang seragam. Secara keseluruhan, konfigurasi ini telah memenuhi prinsip dasar proteksi katodik metode sacrificial anode dan sejalan dengan rekomendasi standar DNV-RP-B401 serta NACE SP0176.

### 3.2. Penempatan Zinc anode pada Lambung dan Void Tank

Pemasangan *zinc anode* pada Elnusa Samudera 8 Accommodation Barge menggunakan sistem *bolted connection* yang dipilih untuk memudahkan penggantian anoda tanpa pengelasan ulang, sehingga mendukung efisiensi pemeliharaan dan kontinuitas proteksi korosi selama operasi kapal. Anoda yang digunakan merupakan tipe berukuran sedang yang umum diaplikasikan pada sistem proteksi katodik lambung dan area internal seperti void tank, dengan dimensi dan berat yang mampu menyediakan arus proteksi yang memadai. Tata letak anoda dirancang dengan jarak terkontrol dan relatif merata berdasarkan pembagian panjang area terendam dan kompartemen struktural kapal, sehingga distribusi arus proteksi dapat berlangsung homogen dan berkesinambungan serta

menghindari terjadinya efek *shielding*. Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan proteksi, sebanyak 50 unit *zinc anode* dipasang pada lambung luar kapal dengan panjang antara garis tegak 60,96 m, sehingga jarak rata-rata antar anoda secara memanjang digunakan sebagai acuan utama dalam penentuan konfigurasi pemasangan untuk menjamin perlindungan yang seimbang pada seluruh permukaan baja. Untuk lebih jelasnya dapat dihitung dari rumus sebagai berikut:

$$\text{Jarak antar anoda} = \frac{\text{Panjang kapal yang tercelup air}}{\text{Jumlah anoda}}$$

$$\text{Jarak antar anoda} = \frac{60,96 \text{ meter}}{50}$$

$$\text{Jarak antar anoda} = 1,22 \text{ meter}$$

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa jarak rata-rata antar anoda pada lambung luar adalah sekitar 1,22 m, yang dirancang untuk memastikan distribusi arus proteksi yang merata dan menghindari terbentuknya area *under-protected*. Namun, berdasarkan pengukuran aktual di lapangan, jarak antar anoda terpasang mencapai  $\pm 1,85$  m atau lebih renggang dibandingkan hasil desain, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.



**Gambar 3.** Jarak Aktual Pemasangan Anoda Lambung Elnusa Samudera 8 Accommodation Barge.  
Sumber: Dokumentasi penulis, 2025

Perbedaan antara perhitungan dan pengukuran aktual ini memiliki implikasi teknis terhadap kinerja sistem proteksi katodik. Jarak yang lebih besar dari nilai perhitungan berpotensi menyebabkan distribusi arus proteksi menjadi kurang merata, terutama pada area yang berada di antara dua anoda, sehingga meningkatkan risiko terbentuknya zona *under-protected*. Kondisi ini menjadi lebih kritis apabila terjadi degradasi *coating* atau peningkatan kebutuhan arus akibat perubahan lingkungan yang dapat mempercepat inisiasi korosi lokal pada permukaan baja. Di sisi lain, jarak yang lebih renggang memang dapat mengurangi jumlah anoda yang digunakan, namun hal ini berpotensi menurunkan tingkat keandalan proteksi dalam jangka panjang.

Meskipun demikian, jarak aktual 1,85 m masih dapat berada dalam batas toleransi tertentu tergantung pada kapasitas arus anoda, resistivitas lingkungan, serta kondisi operasional kapal. Oleh karena itu, perbedaan antara hasil perhitungan dan kondisi aktual ini menunjukkan adanya pendekatan desain yang lebih konservatif dibandingkan implementasi lapangan.

Meskipun dalam implementasinya jarak pemasangan dapat bervariasi mengikuti pembagian kompartemen, posisi *frame*, dan elemen struktural kapal, nilai jarak rata-rata hasil perhitungan tetap digunakan sebagai acuan utama dalam perancangan tata letak anoda. Pendekatan ini sejalan dengan rekomendasi standar DNV dan NACE yang menekankan konsistensi antara hasil perhitungan kebutuhan anoda dan konfigurasi pemasangan di lapangan untuk menjamin efektivitas sistem proteksi katodik.

Sebagai tindak lanjut, diperlukan evaluasi lebih lanjut melalui pengukuran potensial proteksi untuk memastikan bahwa seluruh permukaan lambung tetap berada dalam rentang proteksi yang direkomendasikan. Apabila ditemukan area dengan potensial yang tidak memenuhi kriteria, maka dapat dilakukan penyesuaian berupa penambahan anoda atau optimasi distribusi anoda.

### 3.3. Efisiensi dan Umur Proteksi Zinc Anode

Evaluasi efisiensi proteksi *zinc anode* pada sistem proteksi katodik Elnusa Samudera 8 *Accommodation Barge* dilakukan dengan membandingkan kapasitas arus aktual yang mampu disuplai oleh anoda terhadap kapasitas arus desain yang dibutuhkan oleh struktur selama umur operasi rencana. Pendekatan ini digunakan sebagai indikator kuantitatif untuk menilai kecukupan dan keandalan sistem proteksi yang dirancang, di mana efisiensi proteksi ( $\eta$ ) dinyatakan sebagai:

$$\eta = \frac{\text{Kapasitas arus aktual}}{\text{Kapasitas arus desain}} \times 100\% \quad (3)$$

Kapasitas arus desain ditentukan berdasarkan total kebutuhan muatan listrik untuk mempertahankan kondisi proteksi selama umur desain lima tahun, yang dihitung dari hasil perkalian arus proteksi total dengan waktu operasi. Berdasarkan hasil perhitungan, kebutuhan muatan listrik desain ( $Q_{desain}$ ) adalah sebesar 1.211.070 Ah. Nilai ini merepresentasikan kapasitas minimum yang harus disediakan oleh sistem proteksi katodik agar seluruh permukaan baja tetap berada pada rentang potensial proteksi yang aman. Sementara itu, kapasitas arus aktual ( $Q_{aktual}$ ) ditentukan oleh total berat *zinc anode* yang dipasang, kapasitas arus spesifik anoda, serta faktor pemanfaatan anoda. Dengan berat total anoda sebesar 1.552,65 kg, kapasitas arus *zinc anode* sebesar 780 Ah/kg, dan asumsi faktor pemanfaatan anoda sebesar 1, yang mengindikasikan bahwa seluruh material anoda diasumsikan dapat terpakai secara optimal selama umur desain. Maka diperoleh kapasitas arus aktual sebagai berikut:

$$Q_{aktual} = 1.552,65 \text{ kg} \times 780 \text{ Ah/kg}$$

$$Q_{aktual} = 1.211.067 \text{ Ah}$$

Berdasarkan kedua nilai tersebut, efisiensi proteksi dapat dihitung sebagai:

$$\eta = \frac{1.211.067 \text{ Ah}}{1.211.070 \text{ Ah}} \times 100\%$$

$$\eta = 99 \%$$

Nilai efisiensi proteksi yang mendekati 100% menunjukkan bahwa kapasitas arus aktual *zinc anode* yang dirancang hampir sepenuhnya memenuhi kebutuhan arus desain, sehingga sistem proteksi katodik berada pada kondisi optimal tanpa risiko *under-protection* maupun *over-design*. Efisiensi yang tinggi ini mencerminkan kesesuaian antara parameter desain dan asumsi kondisi operasional kapal, sekaligus menunjukkan pemanfaatan material anoda yang efektif dan ekonomis. Hasil tersebut berada dalam rentang ideal yang direkomendasikan oleh standar DNV-RP-B401 dan NACE SP0176, yang menekankan keseimbangan antara keandalan proteksi dan efisiensi konsumsi anoda. Selain itu, capaian efisiensi ini memperkuat validitas pemilihan variabel desain, khususnya densitas arus dan

umur proteksi, karena perubahan pada parameter tersebut akan berpengaruh langsung terhadap kebutuhan arus dan nilai efisiensi sistem secara keseluruhan.

### 3.4. Evaluasi terhadap Standar Proteksi Katodik

Evaluasi terhadap standar proteksi katodik dilakukan dengan membandingkan parameter hasil perancangan sistem *zinc anode* pada Elnusa Samudera 8 *Accommodation Barge* terhadap rentang nilai yang direkomendasikan oleh standar internasional yang umum digunakan, yaitu DNV-RP-B401 dan NACE SP0176. Parameter utama yang dievaluasi meliputi densitas arus desain, efisiensi proteksi, dan umur desain proteksi, sebagaimana dirangkum pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Rentang nilai parameter proteksi katodik berdasarkan standar DNV-RP-B401 dan NACE SP0176

Parameter	Rekomendasi DNV-RP-B401	Rekomendasi NACE SP0176	Nilai pada penelitian
Densitas arus desain (mA/m <sup>2</sup> )	30 – 40	25 – 40	35
Umur desain proteksi (tahun)	3 – 5	3 – 5	5
Efisiensi proteksi (%)	≥ 90	≥ 90	± 99
Kapasitas arus <i>zinc anode</i> (Ah/kg)	740 – 780	740 – 780	780
Faktor pemanfaatan anoda (U)	0,85 – 1,00	0,85 – 1,00	1,00

Berdasarkan Tabel 3, densitas arus desain sebesar 35 mA/m<sup>2</sup> yang digunakan dalam penelitian ini berada dalam rentang optimum yang direkomendasikan oleh kedua standar, sehingga secara teoritis mampu mengendalikan laju korosi baja karbon di lingkungan laut tanpa menyebabkan konsumsi anoda berlebihan. Efisiensi proteksi yang dicapai, yaitu sekitar 99%, juga melampaui batas minimum standar sebesar 90%, yang menunjukkan bahwa kapasitas arus aktual *zinc anode* termanfaatkan secara efektif untuk memenuhi kebutuhan arus desain. Hasil ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang melaporkan efisiensi proteksi *zinc anode* mencapai 98–99% pada densitas arus 30–40 mA/m<sup>2</sup> dengan umur pakai sekitar lima tahun [29] [30]. Asumsi faktor pemanfaatan anoda (U) sebesar 1,00 dalam penelitian ini merepresentasikan kondisi ideal, di mana seluruh massa anoda dianggap dapat terpakai secara efektif hingga akhir umur desain. Meskipun nilai ini masih berada dalam rentang rekomendasi standar (0,85–1,00), penggunaan nilai maksimum tersebut memerlukan justifikasi teknis yang kuat. Dalam konteks penelitian ini, asumsi U = 1,00 didasarkan pada karakteristik operasi accommodation barge yang relatif statis, sehingga tingkat kehilangan anoda akibat faktor mekanis seperti erosi, benturan, dan kerusakan fisik dapat diminimalkan.

Aspek material, pemilihan *zinc anode* dinilai tepat untuk kapal accommodation barge yang beroperasi di lingkungan laut tropis dan cenderung statis, karena *zinc* memiliki stabilitas potensial yang baik dan risiko overprotection yang lebih rendah dibandingkan aluminium anode, yang pada kondisi kandungan ion klorida tinggi berpotensi mengalami pasivasi dan penurunan efektivitas proteksi.

## 4. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa perancangan sistem proteksi katodik berbasis *zinc anode* pada Elnusa Samudera 8 *Accommodation Barge* dapat dioptimalkan secara teknis dan kuantitatif melalui pendekatan perhitungan yang mengacu pada standar DNV-RP-B401 dan NACE SP0176. Hasil analisis menunjukkan bahwa kebutuhan arus proteksi sebesar 27,65 A, yang diturunkan dari densitas arus desain 35 mA/m<sup>2</sup> dan luas area terproteksi 790 m<sup>2</sup>, dapat dipenuhi oleh sistem dengan total massa

*zinc anode* 1.552,65 kg atau setara dengan 82 unit anoda, sehingga menghasilkan efisiensi proteksi mendekati 100% untuk umur desain lima tahun. Kesesuaian antara kapasitas arus aktual dan kebutuhan desain ini menunjukkan bahwa konfigurasi anoda yang dirancang telah memenuhi prinsip keseimbangan antara efektivitas proteksi dan efisiensi material, serta sejalan dengan standar dan temuan penelitian terdahulu. Implementasi sistem proteksi katodik tersebut mampu menekan laju korosi hingga berada jauh di bawah batas aman kehilangan ketebalan pelat, sehingga berimplikasi positif terhadap peningkatan umur struktur dan keandalan operasional kapal, dengan potensi umur layanan struktur bawah air yang dapat dipertahankan lebih dari 20 tahun melalui penggantian anoda secara berkala. Secara keseluruhan, desain sistem proteksi katodik yang diusulkan telah mengindikasikan bahwa desain sistem proteksi katodik yang diterapkan telah sesuai dengan kriteria teknis dan standar perancangan yang digunakan.

### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada manajemen PT. Elnusa Tbk atas pemberian izin penelitian serta akses terhadap data teknis dan operasional pada unit Elnusa Samudera 8. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Institusi Politeknik Batulicin atas dukungan fasilitas akademik, dan kepada para dosen serta rekan sejawat yang telah memberikan arahan, diskusi ilmiah, dan masukan dalam penyempurnaan artikel ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Syahputra, S. J. Sisworo, and A. Trimulyono, "Analisa Teknis & Ekonomis Perancangan Sistem Pencegahan Korosi Pada Lambung Kapal, Dengan Variasi Sistem Pencegahan Menggunakan ICCP (Impressed Current Cathodic Protection) dibandingkan dengan SACP (Sacrificial Anode Cathodic Protection)," *J. Tek. Perkapalan*, vol. 3, no. 2, pp. 247–253, 2015.
- [2] D. D. Periyanto, "Desain Sistem Proteksi Katodik dengan Anoda Korban (SACP) untuk Pipa Bawah Tanah di Stasiun LRT Kelapa Gading," *J. Rekayasa Ind. dan Mesin*, vol. 6, no. 1, pp. 13–18, 2024, doi: 10.32897/retims.2024.6.1.3438.
- [3] L. Pongsapan and A. Suhadi, "Efektivitas Penggunaan Anoda Korban Paduan Seng Pada Pelat Baja Kapal AISI E 2512 Terhadap Laju Korosi Di Dalam Media Air Laut," *J. Sains Terap.*, vol. 1, no. 1, pp. 40–47, 2015, doi: 10.32487/jst.v1i1.31.
- [4] R. A. Saputra, P. D. Setyawan, S. Sugiman, and A. Zainuri, "Perhitungan laju korosi dan perancangan sistem proteksi katodik anoda korban di lambung kapal tugboat Bontang 04 PT Badak NGL Bontang," *Din. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 2, pp. 87–91, 2017, doi: 10.29303/dtm.v7i2.158.
- [5] R. Indarti, Y. T. Sarungu, and C. Magesang, "Karakterisasi Simulator Sistem Proteksi Katodik Metode Anoda Korban pada Sistem Perpipaan yang Tertanam dalam Tanah," in *Lokakarya Penelitian Industri dan Seminar Nasional Prosiding*, 2018, pp. 41–45. doi: 10.35313/irwns.v9i0.1039.
- [6] P. A. Ibrahim, A. Rahman, and I. Dhamayanthie, "Optimasi Sistem Proteksi Katodik Menggunakan Metode Anoda Korban pada Pipa 8 Inchi Jalur Booster Cemara–Terminal Balongan PT X," *Syntax Lit. J. Ilm. Indones.*, vol. 4, no. 6, pp. 157–164, 2019, doi: 10.36418/syntax-literate.v4i6.640.
- [7] Sunarto and D. Septian, "Analisa Kebutuhan Anoda Korban Seng pada Plat Bottom Kapal di PT. Indonesia Marina Shipyard," *Wahana Tek.*, vol. 4, no. 1, pp. 92–108, 2015, doi:

10.5281/zenodo.3701951.

- [8] A. Goffar, "Rancangan Dasar Perhitungan Proteksi Katodik dengan Menggunakan Anoda Korban Pada Struktur Baja Anjungan Minyak di Lingkungan Air Laut," *Lembaran Publ. LEMIGAS*, vol. 45, no. 1, pp. 79–90, 2011, doi: 10.29017/LPMGB.45.1.686.
- [9] D. Masnur, E. Saputra, and P. Nawangsari, "Analisis Penggunaan Cathodic Protection dengan Metode Sacrificial Anode Sebagai Pengendalian Korosi Pipa Minyak 16 Inci PT. Chevron Pacific Indonesia Simp. Perawang-Minas Area," *J. PROKSIMA Produksi, Konversi Energi, Konstr. dan Mater.*, vol. 1, no. 1, pp. 13–17, 2023, doi: 10.31258/proksima.1.1.13-17.
- [10] B. Hartanto and Salim, "Pemasangan Zinc Anode Protection (ZAP) sebagai Perlindungan Aktif Korosi pada Kapal," *Maj. Ilm. Bahari Jogja*, vol. 21, no. 1, pp. 21–27, 2023, doi: 10.33489/mibj.v21i1.315.
- [11] A. Ansyori, "Perbandingan Kualitas Produk Coran Anoda Seng Menggunakan Cetakan Tembaga dan Cetakan Aluminium Berdasarkan Pengaruh Ukuran Besar Butirnya terhadap Laju Korosi," *J. Rekayasa, Teknol. dan Sains*, vol. 1, no. 1, pp. 47–58, 2017, doi: 10.33024/jrets.v1i1.986.
- [12] H. Wicaksono and B. Sulaksono, "Analysis of Cathodic Protection System Type of Victim Anodes Using Magnesium and Zinc," in *Prosiding SNTTM XVIII*, Surabaya, 2019, pp. 1–4.
- [13] R. F. Raihan, R. K. Bakti, S. Ulyana, D. Rahmawati, and F. Budiman, "Pengembangan Purwarupa Sistem Monitoring dan Proteksi Logam Menggunakan Metode Sacrificial Anode Cathodic Protection Berbasis Internet of Things (IoT)," *J. Teknol.*, vol. 11, no. 1, pp. 15–24, 2023, doi: 10.31479/jtek.v11i1.275.
- [14] U. Wahyuningsih, H. Rusjdi, and E. Sulistiyo, "Penanggulangan Korosi pada Pipa Gas dengan Metode Cathodic Protection (Anoda Korban) di PT PGN Solution Area Tangerang," *J. Power Plant*, vol. 5, no. 1, pp. 40–50, 2017.
- [15] L. Xu, Y. Xin, L. Ma, H. Zhang, Z. Lin, and X. Li, "Challenges and solutions of cathodic protection for marine ships," *Corros. Commun.*, vol. 2, pp. 33–40, 2021, doi: 10.1016/j.corcom.2021.08.003.
- [16] C. Akintoye, R. Tolulope, and A. Patricia, "Performance evaluation of zinc anodes for cathodic protection of mild steel corrosion in HCL," *Chem. Data Collect.*, vol. 24, p. 100280, 2019, doi: 10.1016/j.cdc.2019.100280.
- [17] J. Zhang, C. Sun, Z. Yu, J. Cheng, W. Li, and J. Duan, "The Performance of Zinc Sacrificial Anode in Simulating Marine Fouling Environment," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 9, no. 10, pp. 5712–5721, 2014, doi: 10.1016/S1452-3981(23)08200-7.
- [18] A. . Konsowa and A. . El-Shazly, "Rate of zinc consumption during sacrificial cathodic protection of pipelines carrying saline water," *Desalination*, vol. 153, no. 1–3, pp. 223–226, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01139-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01139-6).
- [19] Z. Guo *et al.*, "Review of Cathodic Protection Technology for Steel Rebars in Concrete Structures in Marine Environments," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 19, p. 9062, 2024, doi: 10.3390/app14199062.
- [20] M. N. Jawad, G. Amouzad, M. Mohammad, and T. Hajibeigy, "Performance improvement of sacrificial anode cathodic protection system for above ground storage tank," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 12, pp. 1–8, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-03823-7.
- [21] D. Clematis, A. Marroccu, M. Panizza, and A. Barbucci, "A Critical Analysis on the Current Design Criteria for Cathodic Protection of Ships and Superyachts," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 7, p. 2645, 2022, doi: 10.3390/ma15072645.
- [22] K. M. D. Ameerq Farooq, Muhammad Hamza, Qadeer Ahmed, "Evaluating the performance of zinc and aluminum sacrificial anodes in artificial seawater," *Electrochim. Acta*, vol. 314, pp. 135–141, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.05.067>.

- [23] A. Karthikeyan and S. Muthusamy, "Performance of zinc sacrificial anode in reinforced cement concrete members under chloride intrusion and marine environment exposure," *REVISTAMATERIA*, vol. 29, no. 4, 2024, doi: 10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0561.
- [24] D. Garcia, S. Laurens, and S. Panin, "Electrochemical behaviour of zinc layer anodes used for galvanic protection of steel in reinforced concrete," *RILEM Tech. Lett.*, vol. 3, pp. 59–65, 2018, doi: 10.21809/rilemtechlett.2018.68.
- [25] D. GL, "Cathodic Protection Design," Oslo, 2017. [Online]. Available: <https://rules.dnv.com/>
- [26] M. N. V. Prasad, P. J. de C. Favas, and S. K. Maiti, *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*. Amsterdam: Elsevier, 2018.
- [27] N. International, "Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production," Houston, 2013. [Online]. Available: <https://catalog.nace.org/SP0176>
- [28] ISO, "ISO 13173:2012 Cathodic protection for steel offshore floating structures," Geneva, 2012.
- [29] A. S. and A. Nugroho, "Analisis efisiensi sistem proteksi katodik anoda tumbal zinc pada struktur baja di lingkungan air laut," *J. Tek.*, vol. 8, no. 2, pp. 145–152, 2020.
- [30] A. Rahman, "Optimasi densitas arus pada sacrificial anode cathodic protection (SACP) untuk pengendalian korosi material pipa," *J. Mater. Pros. Manufaktur*, vol. 5, no. 1, pp. 20–28, 2021.