

Analisis Perhitungan Kebutuhan *Al-Zinc Anode* sebagai Sistem Proteksi Katodik pada Lambung Kapal Tongkang 330 Feet

Charitas Gratia Iswara Jasa Harsana^{*1}, Windy Stefani^{*} and Hendra Saputra^{*}

^{*} Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: charitasgratiaiswara@gmail.com

Abstrak

Korosi pada lambung kapal merupakan permasalahan yang dapat menyebabkan penurunan kekuatan struktur, memperpendek umur pakai kapal, serta meningkatkan biaya perawatan. Kapal tongkang yang beroperasi di lingkungan air laut memiliki risiko korosi yang tinggi karena lambung kapal selalu terendam dan terpapar media korosif. Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengendalikan korosi adalah sistem proteksi katodik menggunakan *sacrificial anode* berbahan paduan *aluminium-zinc (Al-Zn)*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kebutuhan *Al-Zn anode* sebagai sistem proteksi katodik pada lambung kapal tongkang 330 feet, meliputi perhitungan luas area terendam, kebutuhan arus proteksi, berat total anoda, jumlah anoda, dan tata letak pemasangannya. Metode penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan mengacu pada standar Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) dan DNV-RP-B401. Data penelitian diperoleh melalui observasi lapangan, studi dokumen kapal, dan studi literatur. Analisis dilakukan melalui perhitungan *Wetted Surface Area (WSA)*, faktor kerusakan lapisan, kebutuhan arus proteksi, berat total anoda, jumlah anoda, serta jarak dan distribusi pemasangan anoda pada lambung kapal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luas area lambung terendam kapal tongkang 330 feet adalah 2804 m² dengan kebutuhan arus proteksi sebesar 9,81 A. Berdasarkan umur desain proteksi selama 5 tahun, diperoleh kebutuhan berat total *Al-Zn anode* sebesar 177 kg. Dengan menggunakan *Al-Zn anode* seri CMI-WB-114-10-12 berbobot 10,20 kg per buah, jumlah anoda yang dibutuhkan adalah 18 buah yang didistribusikan pada lambung kanan, lambung kiri, bagian haluan, bagian buritan, dan skeg. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *Al-Zn anode* mampu memenuhi kebutuhan proteksi katodik pada lambung kapal tongkang 330 feet sesuai umur desain yang ditetapkan.

Kata kunci: Korosi, proteksi katodik, *aluminium-zinc (Al-Zn) anode*, kapal tongkang, BKI standard

Abstract

Corrosion is a major issue affecting ship hulls, as it can reduce structural strength, shorten service life, and increase maintenance costs. Barges operating in marine environments are particularly susceptible to corrosion because their hulls are continuously exposed to seawater and other corrosive elements. One of the most widely applied methods for corrosion control is cathodic protection using aluminium-zinc (Al-Zn) sacrificial anodes. This study aims to determine the Al-Zn anode requirements for the cathodic protection system of a 330-foot barge hull, including the calculation of the submerged hull area, protection current demand, total anode weight, number of anodes required, and anode installation arrangement. The research employed a quantitative approach based on the standards of Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) and DNV-RP-B401. The required data were collected through field observations, ship documentation, and literature reviews. The analysis involved calculating the Wetted Surface Area (WSA), coating breakdown factor, protection current demand, total anode weight, number of anodes, and the spacing and distribution of anode installation on the ship hull. The results showed that the wetted surface area of the 330-foot barge was 2,804 m², with a protection current demand of 9,81 A. Based on a design life of five years, the total required weight of Al-Zn anodes was calculated to be 177 kg. Using CMI-WB-114-10-12 Al-Zn anodes with an individual weight of 10,20 kg, the required number of anodes was determined to be 18 units, distributed along the starboard and port sides, the forward and aft sections, and the skeg areas. The results indicate that the selected Al-Zn anodes are capable of providing adequate cathodic protection for the 330-foot barge hull throughout the specified design life.

Keywords : Corrosion, cathodic protection, *aluminium-zinc (Al-Zn) anode*, barge vessel, BKI standard

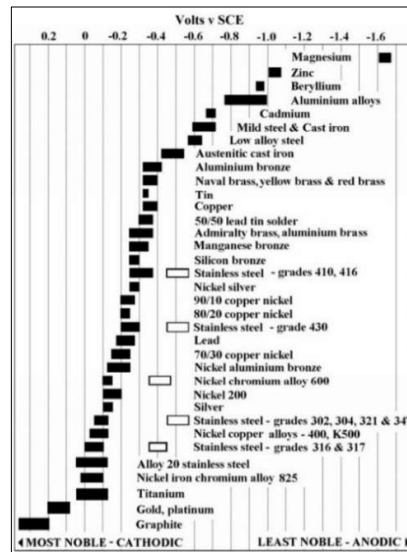
1 Pendahuluan

Lebih dari 80% volume perdagangan barang internasional diangkut menggunakan kapal laut, sehingga menjadikan transportasi laut sebagai tulang punggung utama dalam sistem distribusi barang dan perekonomian global. Di Indonesia sebagai negara kepulauan, kapal laut memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung konektivitas antarwilayah, baik untuk distribusi logistik maupun mobilisasi manusia [1]. Salah satu jenis kapal yang sering digunakan dalam kegiatan pengangkutan adalah kapal tongkang (*barge*). Kapal tongkang merupakan jenis kapal yang memiliki bentuk menyerupai kotak besar dan berlambung datar sehingga dapat mengapung di permukaan air [2]. Dalam operasinya, lambung kapal tongkang selalu bersentuhan langsung dengan air laut sehingga sangat rentan mengalami kerusakan akibat korosi.

Korosi merupakan salah satu permasalahan utama yang dapat mengancam integritas struktur kapal, struktur lepas pantai, serta instalasi pada industri minyak dan gas. Proses korosi dapat menimbulkan kerugian ekonomi yang besar, risiko terhadap keselamatan, serta dampak terhadap lingkungan [3]. Pada struktur kapal, korosi dapat menyebabkan penurunan ketebalan pelat, menurunkan kekuatan struktur, serta memperpendek umur pakai kapal [4]. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem perlindungan yang efektif untuk mengurangi laju korosi pada lambung kapal.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk melindungi struktur baja dari korosi adalah sistem proteksi katodik. Sistem ini bekerja dengan cara mengalihkan reaksi korosi dari material utama menuju material lain yang memiliki potensial elektrokimia lebih rendah. Dalam praktiknya, proteksi katodik dapat diterapkan melalui dua metode utama, yaitu sistem anoda korban (*sacrificial anode*) dan sistem arus tanding (*impressed current cathodic protection*) [5]. Kedua metode tersebut telah banyak digunakan dalam industri maritim dan konstruksi karena terbukti efektif dalam mengendalikan proses korosi pada struktur baja yang berada di lingkungan laut.

Galvanic series merupakan pengelompokan logam berdasarkan nilai potensial korosi (*stationary potential*) yang ditentukan secara empiris, umumnya dalam lingkungan air laut atau larutan netral, sehingga lebih merepresentasikan kondisi aktual dibandingkan nilai *Standard Electromotive Force* (EMF) [6]. Material yang berada pada posisi lebih aktif dalam *galvanic series* akan bertindak sebagai anoda dan mengalami korosi terlebih dahulu dibandingkan material yang lebih mulia (*noble*) sebagai katoda. Oleh karena itu, prinsip ini menjadi dasar dalam menentukan kompatibilitas logam serta pemilihan material pelindung pada sistem proteksi katodik [7]. Dalam sistem proteksi katodik, digunakan anoda korban seperti aluminium (Al), zinc (Zn), dan paduan aluminium-zinc (Al-Zn), karena memiliki kecenderungan teroksidasi lebih dahulu dibandingkan baja [6]. Selain itu, pemilihan material anoda juga didasarkan pada nilai *standard electrode potential*, yaitu kecenderungan suatu logam untuk mengalami reaksi oksidasi atau reduksi terhadap *Standard Hydrogen Electrode* (SHE). Semakin negatif nilai potensial suatu logam, maka semakin besar kecenderungannya untuk bertindak sebagai anoda dalam sistem proteksi katodik.



Gambar 1 Galvanic Series

Stronger oxidizing agent ↑	$\text{F}_2(\text{g}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{F}^-(\text{aq})$	2.87	Weaker reducing agent ↓
	$\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.78	
	$\text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 8 \text{H}^+(\text{aq}) + 5 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 4 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.51	
	$\text{Cl}_2(\text{g}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$	1.36	
	$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}(\text{aq}) + 14 \text{H}^+(\text{aq}) + 6 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Cr}^{3+}(\text{aq}) + 7 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.33	
	$\text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{H}^+(\text{aq}) + 4 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	1.23	
	$\text{Br}_2(\text{l}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{Br}^-(\text{aq})$	1.09	
	$\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ag}(\text{s})$	0.80	
	$\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq})$	0.77	
	$\text{O}_2(\text{g}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2\text{O}_2(\text{aq})$	0.70	
	$\text{I}_2(\text{s}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow 2 \text{I}^-(\text{aq})$	0.54	
	$\text{O}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 4 \text{e}^-$	$\rightarrow 4 \text{OH}^-(\text{aq})$	0.40	
	$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Cu}(\text{s})$	0.34	
	$\text{Sn}^{4+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Sn}^{2+}(\text{aq})$	0.15	
	$2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2(\text{g})$	0	
	$\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Pb}(\text{s})$	-0.13	
	$\text{Ni}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Ni}(\text{s})$	-0.26	
	$\text{Cd}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Cd}(\text{s})$	-0.40	
	$\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Fe}(\text{s})$	-0.45	
	$\text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Zn}(\text{s})$	-0.76	
Weaker oxidizing agent ↓	$2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2 \text{OH}^-(\text{aq})$	-0.83	Stronger reducing agent ↓
	$\text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 3 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Al}(\text{s})$	-1.66	
	$\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Mg}(\text{s})$	-2.37	
	$\text{Na}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Na}(\text{s})$	-2.71	
	$\text{Li}^+(\text{aq}) + \text{e}^-$	$\rightarrow \text{Li}(\text{s})$	-3.04	

Gambar 2 Standard Electrode Potentials [8]

Berdasarkan *standard electrode potential*, aluminium (Al), zinc (Zn), dan paduan aluminium-zinc (Al-Zn) memiliki nilai potensial elektrokimia yang lebih negatif dibandingkan baja, sehingga dapat digunakan sebagai anoda korban dalam sistem proteksi katodik. Material dengan potensial lebih negatif akan lebih mudah mengalami oksidasi dan terkorosi terlebih dahulu, sehingga mampu melindungi struktur baja kapal dari korosi. Pada sistem proteksi katodik tipe *sacrificial anode*, masing-masing material memiliki karakteristik yang berbeda. Aluminium memiliki kapasitas elektrokimia tinggi, massa jenis lebih ringan, serta umur pakai lebih panjang dibandingkan *zinc*, sedangkan *zinc* memiliki tingkat reaktivitas lebih tinggi terhadap baja sehingga mampu memberikan perlindungan lebih cepat [9]. Selain itu, paduan aluminium-zinc (Al-Zn) memiliki potensial elektroda berkisar antara -1,05 hingga -1,10 volt terhadap *Standard Hydrogen Electrode* (SHE), sedangkan baja memiliki potensial sekitar -0,44 volt [10]. Dibandingkan dengan aluminium dan *zinc* murni, paduan aluminium-zinc memiliki kapasitas elektrokimia yang lebih tinggi dan massa jenis yang lebih ringan, sehingga lebih efisien dan banyak digunakan dalam aplikasi proteksi katodik pada lambung kapal serta lingkungan air laut [8, 9]. Berdasarkan berbagai penelitian dan jurnal terdahulu, aluminium (Al), *zinc* (Zn), dan paduan aluminium-zinc (Al-Zn) memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan masing-masing sebagai material anoda korban pada sistem proteksi katodik. Oleh karena itu, pemilihan

material anoda perlu disesuaikan dengan kondisi lingkungan, efisiensi proteksi, serta umur pakai yang diinginkan. Perbandingan karakteristik ketiga material tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan *Sacrificial Anode (Zinc vs. Aluminium vs. Aluminium-Zinc)* [8, 10, 11, 12, 13, 14]

Kriteria Perbandingan	Anoda Zinc (Zn)	Anoda Aluminium (Al)	Paduan Aluminium-Zinc Anode (Al-Zn)
Kapasitas Arus	Rendah (~780 Ah/kg)	Sangat Tinggi (~2980 Ah/kg)	Tinggi dan Stabil (~2500 – 2800 Ah/kg)
Potensial Elektrokimia	-1,05 V (Stabil)	Sangat Aktif (Tidak Stabil)	-1,05 s/d -1,10 V (Optimal dan Stabil)
Densitas (Berat Jenis)	Tinggi (Berat)	Rendah (Ringan)	Rendah (Efisien secara beban kapal)
Laju Konsumsi	Cepat	Lambat (Berisiko Berhenti)	Lambat dan Terkendali
Masalah Pasivasi	Tidak Ada	Sangat Tinggi (Cepat pasif)	Dieleminasi (Tetap aktif oleh Zinc)

Dalam penerapannya, penggunaan *Al-Zn anode* pada lambung kapal tidak hanya bergantung pada pemilihan material, tetapi juga memerlukan perencanaan dan perhitungan yang tepat agar sistem proteksi katodik dapat bekerja secara optimal. Penentuan jumlah, berat, dan jarak pemasangan *Al-Zn anode* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti luas area lambung kapal yang terendam air, kebutuhan arus proteksi, serta karakteristik material anoda yang digunakan. Perhitungan yang tidak tepat dapat menyebabkan perlindungan terhadap korosi menjadi kurang efektif dan tidak memenuhi umur proteksi yang direncanakan. Oleh karena itu, dalam proses perancangannya *Al-Zn anode* mengacu pada standar yang berlaku. Dalam hal ini, Biro Klasifikasi Indonesia (BKI) sebagai lembaga klasifikasi nasional menetapkan ketentuan dalam *Rules for the Classification and Construction* Volume II Section 38, yang mengatur mengenai sistem proteksi katodik, termasuk masa umur proteksi minimum, jenis anoda yang diperbolehkan, serta perhitungan faktor keamanan pada kapal berbendera Indonesia [7]. Selain itu, untuk mendukung keakuratan perhitungan dan kesesuaian dengan praktik internasional, perancangan proteksi katodik juga mengacu pada standar DNV-RP-B401 yang menyediakan metode perhitungan yang lebih rinci terkait kebutuhan arus, massa anoda, dan umur proteksi [16].

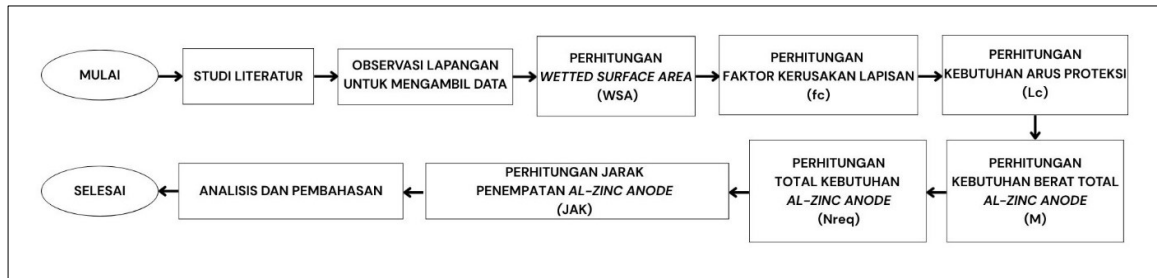
Berdasarkan beberapa penelitian sebelumnya, analisis mengenai kebutuhan *Al-Zn anode* pada sistem proteksi katodik telah banyak dilakukan pada berbagai jenis kapal. Namun, Sebagian besar penelitian tersebut hanya berfokus pada kapal dengan ukuran atau tipe tertentu [11, 12]. Kajian yang secara khusus membahas perhitungan kebutuhan *Al-Zn anode* pada kapal tongkang 330 *feet* masih terbatas, terutama yang menggunakan pendekatan berdasarkan data kapal di galangan serta mengacu pada standar klasifikasi yang berlaku. Hal ini menunjukkan adanya *research gap* yang perlu dikaji lebih lanjut agar diperoleh perhitungan kebutuhan *Al-Zn anode* yang lebih sesuai untuk kapal tongkang 330 *feet*.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kebutuhan *Al-Zn anode* sebagai sistem proteksi katodik pada lambung kapal tongkang 330 *feet*. Penelitian ini bertujuan untuk menghitung luas area lambung kapal yang terendam, menentukan kebutuhan arus proteksi, menghitung berat serta jumlah *Al-Zn anode* yang diperlukan, dan menentukan jarak pemasangan *anode* pada lambung kapal. Metode penelitian yang digunakan meliputi pengumpulan data kapal, perhitungan luas area lambung terendam, perhitungan kebutuhan arus proteksi berdasarkan landasan teori dan standar klasifikasi BKI, perhitungan berat serta jumlah *Al-Zn anode*, dan analisis jarak pemasangan *anode* sehingga diperoleh hasil berupa kebutuhan *Al-Zn anode* serta tata letak pemasangannya pada lambung kapal tongkang 330 *feet*.

2 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian kuantitatif untuk mengestimasi kebutuhan jumlah *Al-Zn anode* pada lambung kapal tongkang 330 *feet* menggunakan rumus yang ditetapkan oleh *rules* BKI. Langkah awal yang diperlukan dalam penelitian ini adalah melakukan studi literatur terkait perhitungan jumlah *Al-Zn anode* pada kapal yang mengacu pada *Rules for Hull* pt. 1 vol. II dan *Guidance for the Corrosion Protection* pt. 1 vol. G

Ch 1, Sec 8 serta menentukan berat dan area yang ditempati *Al-Zn anode* [19]. Adapun bagan alur dalam penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 3 Bagan Alur Penelitian

2.1 Studi Literatur

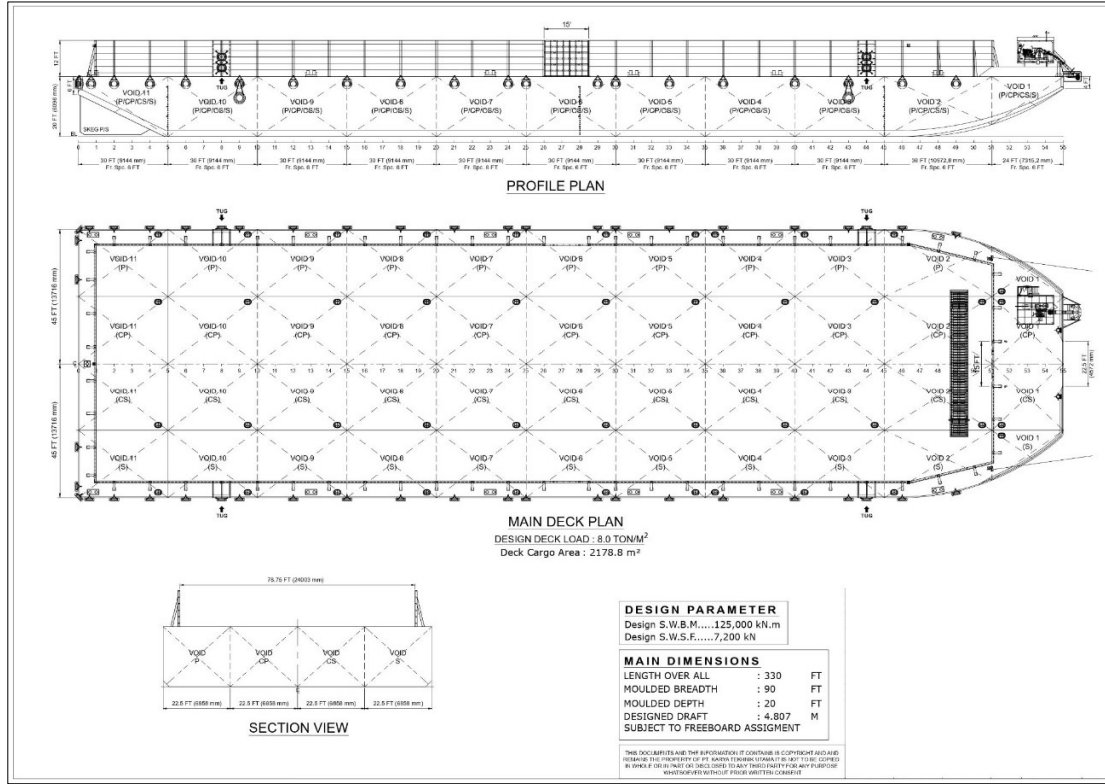
Tahapan awal dalam penelitian ini adalah dengan melakukan studi literatur pada penelitian kapal tongkang 330 *feet*. Pengambilan data dilakukan melalui pengumpulan berbagai sumber referensi yang relevan, seperti jurnal ilmiah dan artikel ilmiah, serta jenis proteksi korosi dan perhitungan kebutuhan anoda pada lambung kapal tongkang 330 *feet*. Proses ini bertujuan untuk mendapatkan dasar teori dan metode perhitungan yang dapat dijadikan acuan dalam penelitian.

2.2 Observasi Lapangan untuk Mengambil Data

Dalam pelaksanaan observasi lapangan pada kapal tongkang 330 *feet*, proses pengambilan data dilakukan secara sistematis untuk memperoleh informasi teknis yang akurat dan dapat digunakan dalam analisis penelitian. Tahap awal dimulai dengan identifikasi objek penelitian, yaitu bagian kapal yang diamati seperti lambung kapal dan sistem proteksi korosi pada kapal serta posisi pemasangan anoda. Selanjutnya, dilakukan pengumpulan data melalui pengamatan langsung di lapangan dan pengukuran dimensi kapal. Selain itu, pengambilan data melalui studi dokumen, seperti *General arrangement* dalam penelitian pada kapal tongkang 330 *feet* memiliki data utama kapal sebagai berikut:

Tabel 2 *Principal Dimensions* Kapal Tongkang 330 *Feet*

Parameter	Nilai
<i>Length Over All</i> (LOA)	100,584 Meter
<i>Length of Perpendicular</i> (LPP)	84,125 Meter
<i>Length of Waterline</i> (LWL)	84,478 Meter
<i>Beam</i> (B)	27,432 Meter
<i>Depth</i> (H)	6,096 Meter
<i>Draft</i> (T)	4,807 Meter



Gambar 4 General Arrangement Kapal Tongkang 330 Feet

2.3 Perhitungan *Wetted Surface Area* (WSA)

Perhitungan luas area basah atau *wetted surface area* (WSA) menjadi penting untuk menentukan jumlah kebutuhan *Al-Zn anode* yang diperlukan. Menghitung luasan lambung kapal dapat menggunakan rumus yang terdapat pada sumber [5].

$$Ac = (2T + B) \times Lpp \times p \quad (1)$$

Keterangan:

- Ac = Area yang akan diproteksi
- B = Lebar kapal
- T = Sarat kapal
- Lpp = Panjang antara garis tegak kapal (m)
- P = Koefisien bentuk lambung 0,9 untuk kapal tongkang

2.4 Perhitungan Faktor Kerusakan Lapisan (F_c)

Untuk menghitung faktor kerusakan lapisan proteksi dapat menggunakan rumus yang terdapat pada sumber [16].

$$F_c = A1 + A2 \times \left(\frac{tf}{2}\right) \quad (2)$$

Keterangan:

- F_c = Faktor kerusakan lapisan (Ampere)
- $A1$ = Konstanta dalam faktor kerusakan lapisan 0,02 (ketentuan DNV-RP-B401)
- $A2$ = Konstanta dalam faktor kerusakan lapisan 0,012 (ketentuan DNV-RP-B401)
- tf = Umur proteksi (5 tahun)

2.5 Perhitungan Kebutuhan Arus Proteksi (L_c)

Perhitungan kebutuhan arus proteksi rata-rata dapat dihitung menggunakan rumus yang terlampir pada sumber [5].

$$L_c = A_c \times f_c \times i_c \quad (3)$$

Keterangan:

- L_c = Kebutuhan arus proteksi (Ampere)
- A_c = Area yang akan diproteksi
- f_c = Faktor kerusakan lapisan
- i_c = Faktor arus densitas 0,070 A/m²

2.6 Perhitungan Berat Total *Al-Zn Anode*

Perhitungan berat total *Al-Zn Anode* dapat dihitung berdasarkan rumus yang diambil dari sumber [16].

$$M = \frac{L_c \times t_f \times 8760}{\mu \times \epsilon} \quad (4)$$

Keterangan:

- M = Berat total *anode*
- L_c = Kebutuhan arus proteksi (Ampere)
- t_f = Umur proteksi 5 tahun
- μ = *Utilization factor* 0,85
- ϵ = Kapasitas elektrokimia untuk *Al-Zn anode* 2700 Ah/Kg

2.7 Perhitungan Total Kebutuhan *Al-Zn Anode*

Menghitung jumlah *Al-Zn anode* untuk pelindung lambung kapal dapat dihitung menggunakan rumus yang terlampir pada sumber [16]:

$$N_{req} = \frac{M}{N_w} \quad (5)$$

Keterangan:

- N_{req} = Jumlah *anode* yang dibutuhkan
- M = Berat total *anode*
- N_w = Berat satuan *anode* (Kg/pcs)

2.8 Perhitungan Jarak Penempatan (JAK)

Jarak penempatan *Al-Zn anode* di bawah air dan dari *draft* ke bawah kapal dan penempatan *Al-Zn anode* dimulai dari garis FP kapal. Untuk jarak penempatan antar *Al-Zn anode* akan dilakukan perhitungan berdasarkan sumber [5].

$$JAK = \frac{Loa}{\Sigma AK_{total}} \quad (6)$$

Keterangan:

- JAK = Jarak antara anoda korban
- Loa = Panjang keseluruhan kapal
- ΣAK_{total} = Jumlah total anoda korban yang dipasang

3 Analisa Data dan Pembahasan

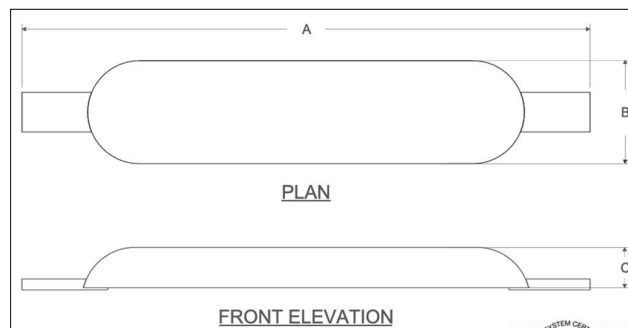


Gambar 5 Al-Zinc Anode Welding Type CMI-WB-114-10-12

Sacrificial anode yang digunakan kapal tongkang 330 feet adalah *Al-Zn anode welding type*. Informasi penggunaan *Al-Zn anode* pada kapal tongkang 330 feet diperoleh dari hasil wawancara dengan salah seorang *Quality Control (QC) Inspector Incharge* pada kapal tersebut. Data *Al-Zn anode* yang dilihat pada tabel berikut ini:

Tabel 3 Spesifikasi *Al-Zn Anode*

Type	Welding
Series	CMI-WB-114-10-12
Dimensi <i>Al-Zn Anode</i>	720 × 540 (a) × 130 (b) × 45 (c) MM
Weight	10,20 Kg
Electrical Capacity	2700 Ah/Kg
Umur Penggantian Sesuai Klasifikasi	5 Tahun



Gambar 6 Dimensi Al-Zn Anode

3.1 Perhitungan *Wetted Surface Area (WSA)*

Perhitungan luas area basah atau *Wetted Surface Area (WSA)* merupakan tahap penting dalam menentukan luas permukaan kapal yang akan diproteksi oleh *sacrificial anode*. *Wetted Surface Area (WSA)* merupakan total luas permukaan lambung kapal yang terendam air pada kondisi sarat air (*draft*) tertentu. Luasan ini mencakup seluruh bagian lambung yang bersentuhan langsung dengan air laut sehingga menjadi area yang berpotensi mengalami korosi dan memerlukan perlindungan sistem proteksi katodik. Luas area yang diproteksi tersebut diperoleh berdasarkan perhitungan menggunakan rumus Persamaan (1) berikut.

$$\begin{aligned}
 Ac &= (2T + B) \times Lpp \times p \\
 Ac &= (2 \times 4,807 \text{ m} + 27,432 \text{ m}) \times 84,125 \text{ m} \times 0,9 \\
 Ac &= 37,046 \text{ m} \times 84,125 \text{ m} \times 0,9 \\
 Ac &= 3115,99675 \text{ m}^2 \times 0,9
 \end{aligned}$$

$$Ac = 2804,397075 \text{ m}^2 = 2804,40 \text{ m}^2$$

$$Ac = 2804 \text{ m}^2$$

Setelah melakukan perhitungan maka didapatkan luas area basah kapal atau *wetted surface area* (WSA) pada kapal tongkang 330 *feet* sebesar 2804 m². Hasil dari perhitungan luas area basah ini akan menjadi dasar untuk menentukan perhitungan jumlah kebutuhan *Al-Zn anode* secara lebih akurat.

3.2 Perhitungan Faktor Kerusakan Lapisan (*Fc*)

Faktor kerusakan lapisan menggambarkan tingkat penurunan kepadatan arus akibat penerapan lapisan atau *coating*. Nilai *Fc* = 0 menunjukkan lapisan tersebut bersifat isolator listrik 100%, sedangkan nilai *Fc* = 1 menunjukkan bahwa lapisan tersebut tidak dapat memberikan perlindungan apa pun [20]. Perhitungan faktor kerusakan lapisan (*Fc*) dapat dihitung sesuai dengan rumus Persamaan (2).

$$Fc = A1 + A2 \times \left(\frac{tf}{2}\right)$$

$$Fc = 0,02 + 0,012 \times \left(\frac{5}{2}\right)$$

$$Fc = 0,02 + 0,012 \times 2,5$$

$$Fc = 0,02 + 0,03$$

$$Fc = 0,05$$

Tabel 4 *Category A1 dan A2* [16]

Depth (m)	Recommended a and b values for Coating Categories I, II, and III		
	I (a = 0,10)	II (a = 0,05)	III (a = 0,02)
0 – 30	b = 0,10	b = 0,025	b = 0,012
>30	b = 0,05	b = 0,015	b = 0,008

Keterangan:

- *Category I* : Satu lapis, lapisan *primer* minimal 50 µm DFT.
- *Category II* : Satu lapis, lapisan *primer* ditambah satu lapis, lapisan tengah atas 150 µm DFT.
- *Category III* : Satu lapis, lapisan *primer* ditambah minimal 2 lapisan menengah atau atas minimal 300 µm DFT.

Berdasarkan spesifikasi sistem pelapisan yang digunakan, kapal tongkang 330 *feet* yang menjadi objek penelitian termasuk dalam *Category III*, karena menggunakan satu lapis dasar (*primer*) yang dilengkapi dengan minimal dua lapis menengah (*intermediate coat*) atau lapis atas (*top coat*), dengan ketebalan lapisan kering (*Dry Film Thickness/DFT*) nominal minimal sebesar 300 µm.

Setelah kategori *coating* ditentukan, langkah berikutnya adalah menentukan desain arus densitas sesuai kondisi lingkungan operasi kapal. Untuk nilai desain arus densitas dapat diperoleh pada tabel berikut ini.

Tabel 5 Desain Arus Densitas [16]

Depth (m)	'Tropical' (>20°C)	'Sub-Tropical' (12 - 20°C)	'Temperate' (7 - 12°C)	'Arctic' (<7°C)
0–30	0,070	0,080	0,100	0,120
>30-100	0,060	0,070	0,080	0,100
>100-300	0,070	0,080	0,090	0,110

>300	0,090	0,100	0,110	0,110
------	-------	-------	-------	-------

Berdasarkan DNV-RP-B401, perairan Indonesia termasuk dalam kategori *tropical* karena memiliki suhu permukaan laut rata-rata tahunan diatas 20°C, yaitu berkisar antara 26 - 31,5 C [21]. Oleh karena itu, nilai desain arus densitas yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada kategori *tropical* dengan arus densitas sebesar 0,070 A/m².

3.3 Perhitungan Kebutuhan Arus Proteksi (*Lc*)

Berdasarkan Tabel 5 di atas, desain arus disesuaikan dengan kondisi *tropical* dengan suhu >20°C dan *depth* 0-30 m, maka nilai keperluan desain arus densitas adalah 0,070 *Ampere*/m². Maka dari itu, untuk perhitungan nilai kebutuhan arus proteksi dapat dihitung menggunakan rumus Persamaan (3).

$$\begin{aligned}
 Lc &= Ac \times fc \times ic \\
 Lc &= 2804 \text{ m}^2 \times 0,050 \times 0,070 \text{ A/m}^2 \\
 Lc &= 140,2 \text{ m}^2 \times 0,070 \text{ A/m}^2 \\
 Lc &= 9,814 \text{ Ampere} = \mathbf{9,81 \text{ Ampere}}
 \end{aligned}$$

Nilai kebutuhan arus proteksi dipengaruhi secara langsung oleh luas area yang diproteksi (*WSA*), faktor kerusakan *coating* (*Fc*), dan desain arus densitas. Semakin besar luas area yang diproteksi maka semakin besar pula arus proteksi yang dibutuhkan.

Parameter-parameter dari hasil perhitungan tersebut akan ditampilkan secara ringkas pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6 Data Parameter Hasil Perhitungan

Parameter	Hasil Perhitungan
<i>Ac</i> (m ²)	2804
<i>Fc</i>	0,05
<i>Lc</i> (<i>Ampere</i>)	9,81
A1	0,02
A2	0,012
<i>ic</i> (<i>Ampere</i> /m ²)	0,070

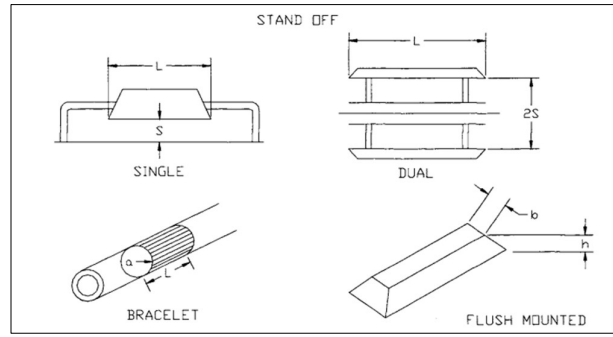
3.4 Perhitungan Berat Total *Al-Zn Anode*

Untuk sesi perhitungan dari berat total kebutuhan *Al-Zn Anode* yang akan digunakan di kapal tongkang 330 *feet* dapat dihitung menggunakan rumus Persamaan (4). Untuk nilai *electrical capacity* yang dimiliki oleh *Al-Zn Anode* seri CMI-WB-114-10-12 sebesar 2700 Ah/Kg. Nilai *electrical capacity* pada katalog *anode* menunjukkan kapasitas elektrokimia efektif *anode* dalam menghasilkan arus listrik selama proses proteksi katodik. Nilai tersebut dipengaruhi oleh komposisi paduan dan efisiensi *anode*, sehingga dapat berbeda dengan kapasitas teoritis material aluminium murni. Sedangkan untuk nilai *Utilization factor Al-Zn Anode* tergantung pada ukuran *anode* yang digunakan. Pada Tabel 7 di bawah ini adalah nilai-nilai *Utilization factor anode* yang sering digunakan pada kapal.

Tabel 7 Nilai-Nilai *Utilization Factor Anode* [16]

Tipe <i>Anode</i>	<i>Utilization Factor Anode</i>
<i>Long slender stand-off</i>	0,9
<i>Short slender stand-off</i>	0,85
<i>Long flush mounted</i>	0,85
<i>Short flush mounted, bracelet, and other types</i>	0,80

Berikut merupakan panjang dari tipe-tipe *sacrificial anode* yang biasa digunakan pada kapal-kapal saat ini.



Gambar 7 Tipe-Tipe Sacrificial Anode [22]

Anode yang digunakan pada penelitian ini merupakan *Al-Zn sacrificial anode tipe welding* dengan bentuk memanjang (*elongated*) dan dipasang langsung menempel pada permukaan lambung kapal (*flush mounted*). Berdasarkan DNV-RP-B401 [16], anode tersebut kategori *long flush mounted anode* karena memiliki dimensi panjang yang lebih dominan dibandingkan lebar dan ketebalannya. Untuk itu, nilai dari data *utilization factor anode* tipe *long flush mounted* sebesar 0,85 dengan nilai *electrical capacity* mencapai 2700 Ah/Kg, sehingga dapat dihitung menggunakan rumus Persamaan (4) seperti di bawah ini.

$$M = \frac{Lc \times tf \times 8760}{\mu \times \epsilon}$$

$$M = \frac{9,81 \text{ A} \times 5 \text{ tahun} \times 8760 \text{ jam/tahun}}{0,85 \times 2700 \text{ Ah/Kg}}$$

$$M = \frac{9,81 \text{ A} \times 43800 \text{ jam}}{0,85 \times 2700 \text{ Ah/Kg}}$$

$$M = \frac{429,678 \text{ Ah}}{2430 \text{ Ah/Kg}}$$

$$M = 176,822 \text{ Kg} = 177 \text{ Kg}$$

Dari perhitungan tersebut maka dapat diketahui kebutuhan berat *Al-Zn Anode* yang dibutuhkan pada kapal tongkang 330 feet paling efisien adalah sebesar 177 Kg.

3.5 Perhitungan Total Kebutuhan *Al-Zn Anode*

Nilai *Wetted Surface Area* (WSA) yang telah diperoleh menunjukkan luas total permukaan lambung kapal yang terendam air laut dan memerlukan perlindungan katodik. Jumlah *Al-Zn anode* pada penelitian ini ditentukan berdasarkan kebutuhan arus proteksi selama umur rencana proteksi serta kapasitas elektrokimia anoda sesuai dengan DNV-RP-B401 [16]. Setelah jumlah anoda diperoleh, dapat dilakukan evaluasi terhadap luas permukaan yang secara efektif dilindungi oleh setiap anoda (*effective protected area*), yaitu luas area rata-rata yang menjadi tanggung jawab satu buah anoda dalam memberikan arus proteksi. Dengan demikian, konsep *effective protected area* digunakan untuk menggambarkan distribusi kemampuan proteksi masing-masing anoda terhadap seluruh *Wetted Surface Area* (WSA) yang diproteksi.

Menghitung jumlah total kebutuhan *Al-Zn anode* yang dibutuhkan oleh kapal tongkang 330 feet dengan ukuran anode sebesar 720 × 540 × 130 × 45 mm dengan berat per pcs 10,20 kg dapat dihitung sesuai dengan persamaan rumus (5).

$$N_{req} = \frac{M}{N_w}$$

$$N_{req} = \frac{177 \text{ kg}}{10,20 \text{ kg/pcs}}$$

$$N_{req} = 17,35 = \mathbf{18 \text{ pcs}}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, kebutuhan *Al-Zn anode* pada kapal tongkang berukuran 330 *feet* dengan panjang keseluruhan (*Length Overall/LOA*) sebesar 100,584 meter adalah sebanyak 18 buah anoda. Anoda tersebut direncanakan untuk dipasang secara merata pada area lambung yang diproteksi, yaitu masing-masing 6 buah pada lambung kanan (*starboard side*) dan 6 buah pada lambung kiri (*port side*), serta 2 buah pada bagian haluan (*forward*) dan 2 buah pada bagian buritan (*aft*). Selain itu, untuk memastikan perlindungan yang memadai pada struktur skeep, dipasang masing-masing 1 buah anoda pada skeep kanan dan skeep kiri.

Setelah jumlah *Al-Zn anode* ditentukan berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan berat, dilakukan evaluasi menggunakan konsep *effective protected area* untuk mengetahui luas permukaan lambung yang secara rata-rata diproteksi oleh setiap anoda. Luas permukaan yang diproteksi oleh setiap anoda dihitung berdasarkan pembagian *Wetted Surface Area* (WSA) terhadap jumlah anoda yang digunakan, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan di bawah ini.

$$A_{EP} = \frac{WSA}{N}$$

$$A_{EP} = \frac{2804 \text{ m}^2}{18 \text{ pcs}}$$

$$A_{EP} = \mathbf{155,77 \text{ m}^2/\text{anoda}}$$

Keterangan:

- A_{EP} = *Effective Protected Area* per Anoda (m^2/anoda)
- WSA = *Wetted Surface Area* (m^2)
- N = Jumlah Anoda (buah)

Nilai tersebut menunjukkan bahwa satu buah *Al-Zn anode* dirancang untuk memberikan perlindungan katodik pada area permukaan lambung kapal seluas 155,77 m^2 . Dengan demikian, sebanyak 18 buah anoda mampu mencakup seluruh *Wetted Surface Area* (WSA) sebesar 2804 m^2 sehingga perlindungan katodik dapat didistribusikan secara merata pada seluruh permukaan lambung kapal.

3.6 Perhitungan Jarak Penempatan (JAK)

Dalam sistem perlindungan *Al-Zn Anode* sebagai *sacrificial anode*, perhitungan jarak pemasangan *anode* menjadi faktor penting untuk memastikan efektivitas perlindungan terhadap korosi dapat dihitung sesuai dengan persamaan rumus (6).

$$JAK = \frac{Loa}{\Sigma AK_{total}}$$

$$JAK = \frac{100,584 \text{ m}}{9 \text{ pcs}}$$

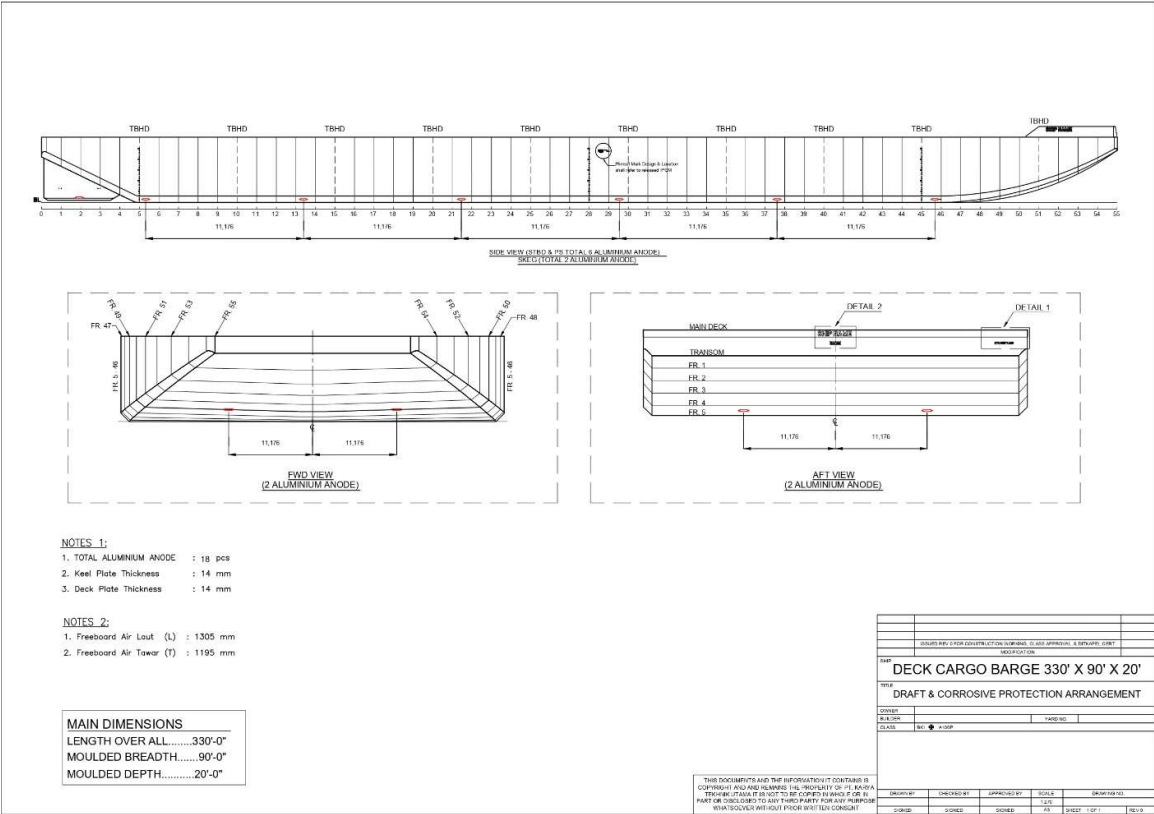
$$JAK = \mathbf{11,176 \text{ m/pcs}}$$

Setelah mengetahui jumlah *Al-Zn anode* yang dibutuhkan dan juga jarak pemasangan antar *Al-Zn anode* tersebut maka selanjutnya bisa dijadikan acuan dasar untuk membuat gambar pemasangan dari *Al-Zn anode* tersebut.

3.7 Penggambaran Penempatan *Al-Zn Anode*

Setelah jumlah kebutuhan *Al-Zn anode* dan jarak pemasangannya diperoleh berdasarkan hasil perhitungan yang

mengacu pada regulasi yang berlaku, dilakukan perencanaan penempatan *anode* pada lambung kapal. Perencanaan tersebut kemudian divisualisasikan dalam bentuk gambar tata letak *anode* atau *Al-Zn anode plan* sebagai acuan pemasangan pada kapal.



Gambar 8 Al-Zn Anode Arrangement Plan

Berdasarkan hasil perhitungan, total kebutuhan *Al-Zn anode* pada kapal tongkang 330 feet adalah sebanyak 18 buah. Anoda tersebut didistribusikan pada area lambung yang terendam air laut, yaitu masing-masing 6 buah pada lambung kanan (*starboard side*) dan lambung kiri (*port side*), serta masing-masing 2 buah pada bagian haluan (*forward*) dan buritan (*aft*). Distribusi yang seimbang pada kedua sisi lambung bertujuan untuk menghasilkan penyebaran arus proteksi yang merata sehingga seluruh area yang diproteksi dapat terlindungi secara efektif dari korosi.

Selain itu, masing-masing 2 buah anoda dipasang pada skeg kanan dan kiri untuk memastikan area tersebut tetap memperoleh perlindungan katodik yang memadai. Skeg merupakan struktur yang menonjol di bagian bawah buritan dan memiliki karakteristik aliran air serta geometri yang berbeda dibandingkan lambung utama, sehingga memerlukan pemasangan anoda secara khusus. Tata letak pemasangan *Al-Zn anode* yang direncanakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 8 dan diharapkan mampu memberikan distribusi arus proteksi yang optimal selama umur desain proteksi yang ditetapkan.

Setelah diperoleh nilai *effective protected area* sebesar 155,77 m² per anoda, luas perlindungan tersebut kemudian divisualisasikan dalam bentuk lingkaran ekuivalen untuk memberikan gambaran mengenai daerah perlindungan setiap anoda pada proses penyusunan *Al-Zn Anode Arrangement Plan*. Pendekatan ini digunakan semata-mata sebagai ilustrasi geometris agar distribusi anoda pada permukaan lambung kapal dapat dilakukan secara merata, bukan sebagai dasar dalam menentukan jumlah anoda.

Dengan mengasumsikan bahwa luas perlindungan setiap anoda berbentuk lingkaran maka radius perlindungan dapat

dihitung menggunakan persamaan luas lingkaran sebagai berikut.

$$\begin{aligned}A &= \pi r^2 \\r &= \sqrt{\frac{A}{\pi}} \\r &= \sqrt{\frac{155,77 \text{ m}^2}{3,14}} \\r &= 7,04 \text{ m}\end{aligned}$$

Keterangan:

- A = *Effective Protected Area* per Anoda (m^2)
- r = Radius Perlindungan Ekuivalen (m)

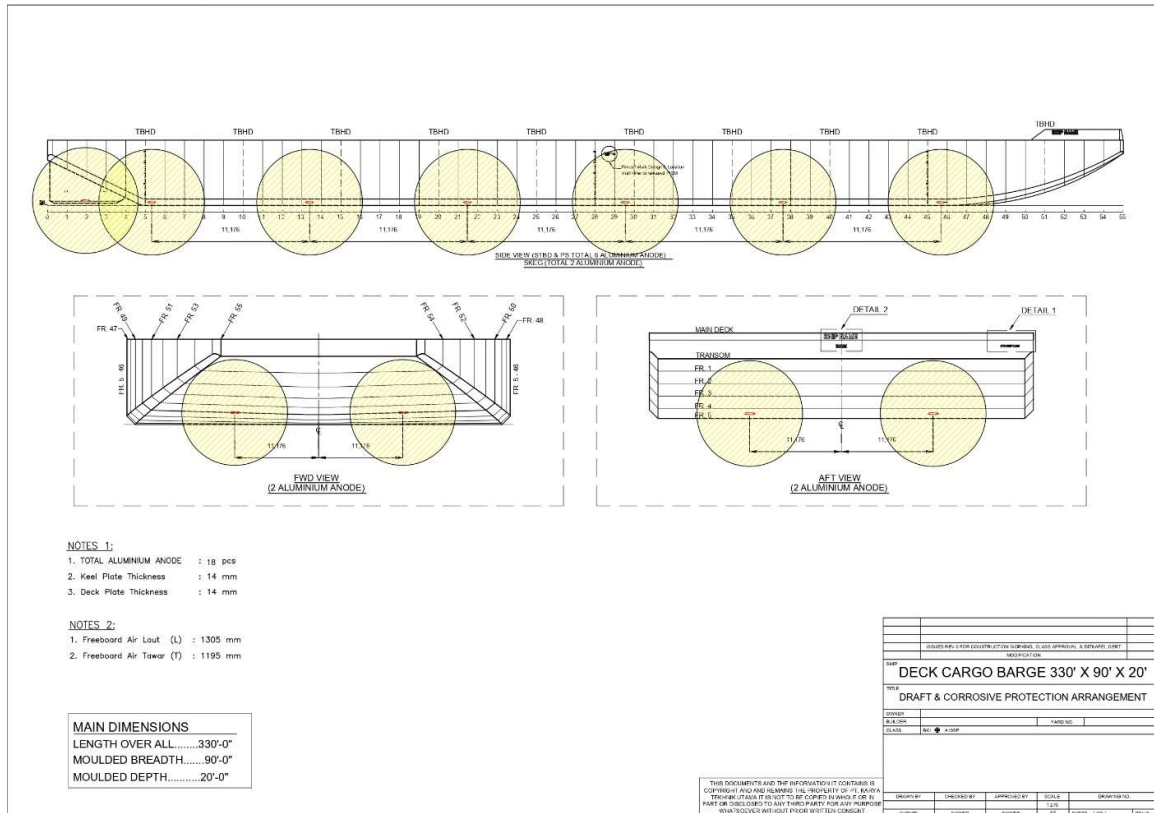
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa setiap *Al-Zn anode* memiliki radius perlindungan ekuivalen sekitar 7,04 m, atau diameter sekitar 14,08 m. Radius ini digunakan sebagai acuan visual dalam penyusunan *Al-Zn Anode Arrangement Plan* sehingga distribusi anoda dapat dilakukan secara merata dan seluruh permukaan lambung kapal berada dalam cakupan perlindungan katodik. Perlu ditegaskan bahwa radius tersebut merupakan hasil konversi geometris dari *effective protected area* dan bukan radius proteksi yang secara eksplisit ditetapkan dalam standar DNV ataupun ditentukan berdasarkan fenomena elektrokimia.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode DNV-RP-B401 [16] diperoleh kebutuhan minimum sebanyak 18 buah *Al-Zn anode* untuk melindungi permukaan lambung kapal selama umur desain yang telah ditentukan. Jumlah tersebut diperoleh berdasarkan parameter desain berupa kebutuhan arus proteksi, luas permukaan yang diproteksi, kapasitas elektrokimia anoda, *utilization factor*, dan umur desain sehingga merepresentasikan kebutuhan minimum sistem proteksi katodik sesuai metode yang digunakan.

Berdasarkan hasil observasi lapangan pada kapal aktual di industri galangan kapal, jumlah *Al-Zn anode* yang terpasang pada kapal aktual adalah 64 buah, sehingga terdapat perbedaan jumlah dibandingkan hasil perhitungan teoritis. Perbedaan tersebut tidak secara langsung menunjukkan bahwa hasil perhitungan penelitian bermasalah, karena hasil perhitungan pada penelitian ini diperoleh berdasarkan asumsi dan parameter desain yang digunakan dalam metode DNV-RP-B401 [16]. Sementara itu, konfigurasi anoda pada kapal aktual dapat dipengaruhi oleh pertimbangan desain lain pada tahap implementasi.

Clematis et al. [17] menjelaskan bahwa desain sistem proteksi katodik pada kapal dipengaruhi oleh berbagai kriteria desain, seperti kebutuhan arus proteksi (*current demand*), kondisi pelapisan (*coating breakdown*), umur desain, serta pendekatan desain yang digunakan. Oleh karena itu, penerapan kriteria atau asumsi yang berbeda dapat menghasilkan konfigurasi sistem proteksi katodik yang berbeda, meskipun diterapkan pada kapal dengan karakteristik yang serupa. Dengan demikian, perbedaan jumlah anoda antara hasil perhitungan penelitian dan kondisi aktual di lapangan tidak dapat langsung diinterpretasikan sebagai kesalahan perhitungan, melainkan sebagai konsekuensi dari perbedaan dasar perancangan yang digunakan.

Berdasarkan uraian tersebut, hasil perhitungan sebanyak 18 buah *Al-Zn anode* pada penelitian ini tetap dapat dipertanggungjawabkan sebagai kebutuhan minimum berdasarkan metode DNV-RP-B401 [16], sedangkan jumlah 64 buah yang digunakan pada kapal aktual merupakan konfigurasi implementasi yang disusun berdasarkan pertimbangan desain pada tahap pembangunan kapal.



Gambar 9 Al-Zn Anode Arrangement Plan dengan ilustrasi effective protected area setiap Al-Zn anode

Lingkaran berwarna kuning pada Gambar 9 merupakan representasi geometris dari *effective protected area* setiap Al-Zn anode yang diperoleh berdasarkan hasil perhitungan. Visualisasi tersebut digunakan untuk memberikan gambaran distribusi anoda pada permukaan lambung kapal dan bukan merupakan radius proteksi yang secara eksplisit ditetapkan dalam standar DNV-RP-B401 maupun representasi distribusi potensial listrik yang sebenarnya. Oleh karena itu, visualisasi lingkaran tidak harus saling bertumpang tindih (*overlapping*), karena jumlah dan penempatan anoda pada penelitian ini telah ditentukan berdasarkan kebutuhan arus proteksi, massa anoda, umur desain, dan parameter desain lainnya sesuai metode DNV-RP-B401.

Selain mempertimbangkan distribusi anoda pada sisi *port* dan *starboard*, penelitian ini juga menempatkan Al-Zn anode pada bagian haluan kapal. Penempatan tersebut bertujuan agar seluruh permukaan lambung yang terendam tetap memperoleh distribusi arus proteksi secara merata, mengingat bagian haluan juga merupakan area yang terpapar air laut selama kapal beroperasi sehingga tetap berpotensi mengalami korosi.

Bagian haluan merupakan area yang memiliki kemungkinan lebih tinggi mengalami benturan dengan benda terapung, dermaga, maupun struktur lain selama proses sandar atau operasi kapal. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan kerusakan mekanis pada anoda maupun sistem pengikatnya apabila benturan terjadi secara langsung. Namun demikian, potensi benturan tersebut tidak secara langsung menurunkan kinerja elektrokimia anoda selama anoda masih terpasang dengan baik, memiliki kontinuitas listrik terhadap lambung kapal, dan masih memiliki massa yang cukup untuk menghasilkan arus proteksi.

DNV-RP-B401 [16] menjelaskan bahwa pemilihan tipe anoda dan sistem pemasangannya harus mempertimbangkan gaya yang bekerja selama proses instalasi maupun selama masa operasi kapal sehingga risiko kerusakan pada anoda dan sistem pengikat dapat diminimalkan. Oleh karena itu, selain memperhatikan kebutuhan proteksi katodik, aspek kekuatan pemasangan juga menjadi pertimbangan dalam penempatan anoda pada area yang berpotensi menerima

beban mekanis.

Browlie et al. [23] juga menjelaskan bahwa pada lingkungan yang mengalami *erosion-corrosion*, laju korosi baja karbon dapat meningkat akibat kombinasi pengaruh mekanis dan elektrokimia. Dalam kondisi tersebut, proteksi katodik tetap mampu menurunkan laju korosi secara signifikan selama sistem anoda masih berfungsi sebagaimana mestinya. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan potensi benturan pada area haluan tidak menjadi alasan untuk menghilangkan pemasangan anoda, melainkan menjadi dasar untuk memperhatikan metode pemasangan serta inspeksi berkala terhadap kondisi anoda.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, penempatan *Al-Zn anode* pada bagian haluan dalam penelitian ini tetap dapat dipertahankan karena area tersebut merupakan bagian lambung yang terendam dan memerlukan perlindungan terhadap korosi. Potensi benturan yang terjadi lebih berkaitan dengan kemungkinan kerusakan fisik pada anoda atau sistem pengikatnya, sedangkan efektivitas proteksi katodik tetap dapat dipertahankan selama anoda masih memiliki kontinuitas listrik dengan struktur kapal serta kapasitas anoda masih mencukupi. Oleh karena itu, penempatan anoda pada bagian haluan perlu disertai dengan metode pemasangan yang memadai serta inspeksi berkala selama masa operasi kapal untuk memastikan sistem proteksi katodik tetap bekerja secara optimal.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan menggunakan metode perhitungan mengacu pada standar DNV-RP-B401, dapat disimpulkan bahwa metode tersebut mampu digunakan untuk menentukan kebutuhan *Al-Zn anode* sebagai sistem proteksi katodik pada lambung kapal tongkang 330 *feet* sehingga rumusan masalah penelitian dapat terjawab. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa luas area lambung kapal yang terendam (*Wetted Surface Area/WSA*) adalah sebesar 2.804 m², yang menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan arus proteksi. Berdasarkan luas area tersebut, diperoleh kebutuhan arus proteksi sebesar 9,81 A dengan menggunakan parameter desain sesuai kondisi perairan tropis dan kategori pelapisan III. Selanjutnya, berdasarkan kebutuhan arus proteksi tersebut diperoleh kebutuhan minimum *Al-Zn anode* sebesar 177 kg atau 18 buah *Al-Zn anode* tipe CMI-WB-114-10-12 untuk memenuhi umur desain proteksi selama 5 tahun. Hasil perhitungan juga menunjukkan bahwa anoda tersebut dapat didistribusikan pada lambung kanan, lambung kiri, haluan, buritan, dan skeg dengan jarak pemasangan yang telah ditentukan berdasarkan metode DNV-RP-B401, sehingga mampu memenuhi kebutuhan minimum sistem proteksi katodik pada lambung kapal tongkang 330 *feet*.

5 Daftar Pustaka

- [1] T. I. Mahendra, "Proteksi Katodik Menggunakan Zinc Anode untuk Menghambat Korosi Pada Lambung Kapal Port Link VII Jakarta," vol. 3, no. 1, Jan. 2020.
- [2] N. S. Riyanto, H. Yudo, and A. Trimulyono, "Analisa Kekuatan Deck Akibat Perubahan Muatan Pada Tongkang TK. Nelly-34," *Jurnal Teknik Perkapalan*, vol. 8, no.2, pp. 454-460, Jul.2020.
- [3] M. M. H. Imran, S. Jamaludin, and A. F. Mohamad Ayob, "A critical review of machine learning algorithms in maritime, offshore, and oil & gas corrosion research: A comprehensive analysis of ANN and RF models," *Ocean Eng.*, vol. 295, p. 116796, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.116796.
- [4] Muh. Syaifullah, J. Sade, and P. Paroka, "Analysis Of Needs And Placement Of Zinc Anode For New Ferry Ship Buildings," *Marit. Park J. Marit. Technol. Soc.*, pp. 44–54, Jun. 2024, doi: 10.62012/mp.v3i2.35389.
- [5] B. Sudjasta, P. J. Suranto, and H. Setiani, "Analisis Kebutuhan Pemasangan Zinc Anode untuk Mencegah Korosi Pada Lambung Kapal General Cargo," *Bina Tek.*, vol. 14, no. 2, p. 209, Dec. 2018, doi: 10.54378/bt.v14i2.402.
- [6] A. Šulčiūtė and A. Šulčius, "Interpretation of galvanic series when teaching metal corrosion," *Chem. Teach. Int.*, vol. 7, no. 3, pp. 553–561, Sep. 2025, doi: 10.1515/cti-2024-0105.
- [7] T. N. T. Doan, H. H. Nguyen, and T. K. V. Nguyen, "Optimization of Hull Protective Materials Using Sacrificial Anodes: Review," *Int. J. Educ. Soc. Sci. Res.*, vol. 04, no. 06, pp. 312–320, 2021, doi: 10.37500/IJESSR.2021.4622.
- [8] G. A. Mabbott, *Electroanalytical chemistry: principles, best practices, and case studies*, First edition. in *Chemical analysis a series of monographs on analytical chemistry and its applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2020. doi: 10.1002/9781119538721.
- [9] P. Pratisna, H. Prasetya, D. Deriva, and N. W. Permana, "Comparative Study Of The Casualty Anode Cathodic Protection System Between Zinc Anode (Zn) And Aluminum Anode (Al) In," vol. 12, no. 1, 2025.
- [10] Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), "Rules for Hull Construction," vol. II, Jan. 2026
- [11] T. OlubunmiAwodiji, A. O. Hannah, C. Ekwueme, and Q. H. Taiwo, "Cathodic Protection Of Stainless And Galvanised Steels In Marine Environments Using Aluminium And Zinc As Sacrificial Anodes," vol. 11, no. 4, 2024.
- [12] T. Kyada, S. Patel, A. Babu, S. Lulaniya, and T. Rakholiya, "Aluminium Alloy as Sacrificial Anode for Corrosion Protection: A Review," *Int. J. Metall. Alloys*.
- [13] M. Finšgar, "Galvanic series of different stainless steels and copper- and aluminium-based materials in acid solutions," *Corros. Sci.*, vol. 68, pp. 51–56, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.corsci.2012.10.032.
- [14] A. Mahgoub and G. Houtan, "Limitation of Aluminum Anode in Cathodic Protection Applications," 2024.
- [15] A. Bastari, "The Comparison Study Of Cathodic Protection System Of Victim Anoda Between Zink Anoda (Zn) And Aluminum Anoda (Al)".
- [16] Det Norske Veritas (DNV), "DNV-RP-B401 Cathodic Protection Design," Oct. 2010.
- [17] 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*, vol. 15, no. 7, p. 2645, Apr. 2022, doi: 10.3390/ma15072645.
- [18] Y. Xi, M. Jia, J. Zhang, W. Zhang, D. Yang, and L. Sun, "Evaluating the Performance of Aluminum Sacrificial Anodes with Different Concentration of Gallium in Artificial Sea Water," *Coatings*, vol. 12, no. 1, p. 53, Jan. 2022, doi: 10.3390/coatings12010053.

- [19] Biro Klasifikasi Indonesia (BKI), "Guidance for The Corrosion Protection and Coating Systems," vol. G, Jul. 2025.
- [20] Y. Bai and Q. Bai, Subsea engineering handbook. Burlington, MA: Gulf Professional Pub, 2010.
- [21] M. Dj. Syaifullah, "Suhu Permukaan Laut Perairan Indonesia dan Hubungannya dengan Pemanasan Global," J. Segara, vol. 11, no. 2, Dec. 2018, doi: 10.15578/segara.v11i2.7356.
- [22] Y. Bai and Q. Bai, Subsea Pipelines and Risers. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 2005. doi: 10.1016/B978-0-08-044566-3.X5000-3.
- [23] F. Brownlie *et al.*, "Effect of cathodic protection methods on ferrous engineering materials under corrosive wear conditions," *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 6, pp. 480–486, Aug. 2020, doi: 10.1080/1478422X.2020.1742997.

4412201014 Charitas Gratia Iswara Jasa Harsana - Analisis Perhitungan Kebutuhan Al-Zinc Anod Sistem Proteksi Katodik pada Lambung Kapal Tongkang 330 Feet.pdf

ORIGINALITY REPORT

15%

SIMILARITY INDEX

12%

INTERNET SOURCES

4%

PUBLICATIONS

3%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1 repository.polibatam.ac.id

Internet Source

2 www.scribd.com

Internet Source

3 repositorio.poli.ufrj.br

Internet Source

4 Muh Yusril Syam. "ANALISIS KEBUTUHAN ZINC ANODE PADA SISTEM PROTEKSI KATOD ELNUSA SAMUDERA 8 ACCOMMODATION BARGE", INOVTEK Polbeng, 2026

Publication

5 repository.its.ac.id

Internet Source

6 repository.unhas.ac.id

Internet Source

7 Chris Googan. "Marine Corrosion and Cathodic Protection", CRC Press, 2022

Publication

8 Lilik Khoiriyah, Muhammad Al Hazman, Ruddianto, Andri Djumiati, Yulia Ayu Nastiti, Sit Rahayuningsih. "ANALISIS VALIDASI PERHITUNGAN HIDROSTATIK KAPAL NIAGA: PERBANDINGAN ANTARA METODE MANUAL DAN SIMULASI KOMPUTASI MENGGUNAKAN MAXSURF", INOVTEK Polbeng, 2025

Publication

9 rules-api.bki.co.id

Internet Source

10 Submitted to Universitas Samudra

Student Paper

11 Wasis Dwi Aryawan, Hesty Anita Kurniawati, Rizky Chandra Ariesta, Haikal Anjasmara e "Chapter 29 Semi-submersible Trimaran Hull Form Improvement to Reduce Ship Fuel Consumption", Springer Science and Business Media LLC, 2024

Publication

12 Submitted to Universitas Diponegoro

Student Paper

13 dinamika.unram.ac.id
Internet Source

14 adoc.pub
Internet Source

15 core.ac.uk
Internet Source

16 danielstephanus.wordpress.com
Internet Source

17 anzdoc.com
Internet Source

18 edoc.pub
Internet Source

19 es.scribd.com
Internet Source

20 portalrecerca.uab.cat
Internet Source

Exclude quotes

Off

Exclude matches

Off

Exclude bibliography

On